

0-790187

На правах рукописи

ДУБКОВА НАИЛЯ ЗУФАРОВНА

**ПОЛУЧЕНИЕ ПИЩЕВЫХ ПОРОШКОВ В СУШИЛКАХ-МЕЛЬНИЦАХ
ВИБРАЦИОННОГО ТИПА**

05.18.12 – Процессы и аппараты пищевых производств

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук



Казань - 2011

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор
Николаев Андрей Николаевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Антипов Сергей Тихонович
доктор технических наук, профессор
Габитов Фаризан Ракибович
доктор технических наук, профессор
Садыков Ренат Ахатович

Ведущая организация:

ГОУ ВПО Оренбургский государственный
университет

Защита диссертации состоится « 25 » ноября 2011 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.080.06 при Казанском национальном исследовательском технологическом университете по адресу: 420015, г. Казань, ул. К.Маркса, 68, зал заседаний Учёного совета (А-330).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского национального исследовательского технологического университета.

Автореферат разослан « 14 » октября 2011 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор



НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000687876

С.И. Поникаров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Основной целью пищевой промышленности является снабжение населения качественными натуральными продуктами питания. Овощи и фрукты должны круглый год присутствовать в рационе питания человека, как незаменимый источник витаминов, органических кислот, минеральных веществ, необходимый для полноценной жизнедеятельности людей. Поэтому хранение и переработка растительного сырья с сохранением всех его питательных свойств является основной задачей пищевой и перерабатывающей промышленности.

Важным фактором, определяющим эффективность переработки растительного сырья, является сезонность его поступления на хранение и переработку, а также урожайность, изменяющаяся из года в год. Сезонность поступления скоропортящихся продуктов обуславливает сжатые сроки их переработки. Это приводит к необходимости разработки и внедрения таких способов переработки, при которых у растительного сырья вырабатывается способность к длительному хранению при сохранении состава исходного сырья.

Традиционные формы хранения и транспортирования растительного сырья предполагают ограниченные сроки и сложные условия хранения продукции. Большой объём сельскохозяйственного сырья делает его хранение и транспортировку сложными, дорогостоящими, громоздкими и энергоёмкими. Кроме того, неизбежны потери, как самого сырья, так и его ценных компонентов при воздействии влаги и высоких температур, например, при консервировании.

Порошковый способ является наиболее перспективным, эффективным и компактным способом длительного хранения без потерь и транспортировки растительного сырья. Кроме того, в качестве сырья для этой технологии могут использоваться как цельные продукты, так и остатки других производств по переработке ягод, фруктов, овощей, которые содержат немало ценных компонентов. Пищевые порошки освобождены от значительной части влаги, содержащейся в обычных продуктах, в связи с чем, имеют незначительный объём, массу и высокую концентрацию питательных веществ. Низкая влажность порошков благоприятствует их длительному хранению при максимальной степени сохранения питательных свойств исходного продукта.

Существующие способы получения пищевых порошков являются громоздкими в аппаратном оформлении, энергоёмкими, продолжительными по времени, поэтому проблема создания новых высокоэффективных технологий переработки растительного сырья является актуальной задачей пищевой индустрии.

В современных условиях внедрение энергосберегающих технологий является одним из важных направлений повышения эффективности производства и умелого ведения технологических процессов в рыночных условиях хозяйствования предприятий. Одним из самых энергоёмких процессов на многих предприятиях является сушка. В частности, продолжительность сушки растительного сырья, являющегося наиболее ярким представителем термолабильных капиллярнопористых материалов, занимает до нескольких часов в зависимости от свойств перерабатываемого материала, что обусловлено невозможностью повышения температуры процесса, приводящей к снижению качества продукта.

Значительно сократить продолжительность процесса, а значит, и снизить его себестоимость, позволяет проведение сушки и измельчения в одном аппарате для постоянного обновления поверхности испарения свободной влаги. Однако данные технологии до сих пор не имеют расчетной базы, позволяющей получить оптимальные режимные параметры процесса. Кроме того, нет четких рекомендаций по выбору той или иной технологии сушки с одновременным измельчением применительно к различным видам растительного сырья. Разработка методов расчета технологических процессов сушки растительного сы-

рья при сопутствующем измельчении, совершенствование действующих и создание новых высокоэффективных ресурсо- и энергосберегающих технологий и их аппаратурного оформления является актуальной задачей, имеющей важное хозяйственное значение.

Работа выполнялась в соответствии с федеральной целевой программой «Приоритетные направления науки и техники» (гос. контракт № 02.516.11.6040); в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (гос. контракты № 02.740.11.0062; 02.740.11.0753; П560).

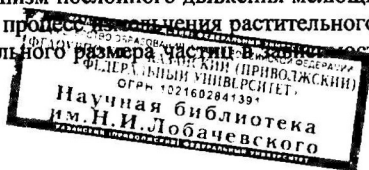
Целью работы является исследование процессов получения пищевых порошков из растительного сырья с совмещением сушки и вибрационного измельчения при пониженном давлении, разработка их аппаратурного оформления и методов расчета.

В соответствии с поставленной целью в настоящей работе решались следующие задачи:

- разработка способов получения пищевых порошков из растительного сырья совмещением сушки и измельчения в одном аппарате;
- экспериментальные исследования закономерностей движения перерабатываемого материала в вибрационном аппарате непрерывного действия;
- разработка теоретической схемы движения мелющих тел в вибрационном аппарате с круговой траекторией колебаний корпуса;
- теоретические исследования условий движения и взаимодействия частицы материала с вибрирующим корпусом, определение оптимальных параметров вибрации из условий максимальной скорости циркуляции загрузки;
- экспериментальные исследования кинетики измельчения растительного сырья различной влажности в диапазоне режимных параметров аппаратов;
- экспериментальные исследования кинетики сушки различных видов сырья в зависимости от режимных параметров процесса;
- разработка математического описания процессов сушки растительного сырья с сопутствующим вибрационным измельчением при кондуктивном и кондуктивно-конвективном способах подвода тепла;
- определение затрат мощности на перемешивание загрузки в зависимости от режимных параметров процессов сушки и измельчения;
- разработка аппаратурного оформления технологических процессов производства пищевых порошков совмещением в одном аппарате сушки и измельчения и промышленная реализация результатов теоретических и экспериментальных исследований и конструкторских разработок.

Научная новизна работы заключается в том, что:

- впервые исследованы и обобщены закономерности процесса получения пищевых порошков из растительного сырья совмещением сушки и измельчения в аппаратах вибрационного типа;
- в результате экспериментальных исследований структуры потока перерабатываемого материала в вибрационном аппарате были определены режимные параметры, обеспечивающие необходимое для сушки материала среднее время пребывания;
- в результате исследований условий циркуляции материала в вибрационном аппарате, определена зависимость времени контакта перерабатываемого материала с греющей поверхностью и оптимальные параметры вибрации из условий максимальной скорости циркуляции загрузки; разработанный механизм послынного движения мелющих тел в вибрационном аппарате, позволил проводить процесс измельчения растительного сырья в рациональных режимах за счет выбора начального размера частиц в зависимости от амплитуды колебаний корпуса;



- в результате экспериментальных исследований выявлены кинетические закономерности процессов сушки при пониженном давлении, вибрационном смещении и измельчении растительного сырья при производстве пищевых порошков при кондуктивном и кондуктивно-конвективном способах подвода тепла;

- экспериментальные исследования кинетики измельчения растительного сырья различной влажности при различных параметрах вибрации позволили выявить, что измельчение не является лимитирующим процессом при производстве порошковых продуктов, а лишь интенсифицирует процесс сушки, за счет постоянного обновления поверхности испарения свободной влаги;

- в результате экспериментальных исследований получены зависимости коэффициента внешнего трения для различного растительного сырья в зависимости от влажности образцов, определены зависимости затрат мощности на перемешивание загрузки при проведении процессов сушки и измельчения в вибрационных аппаратах;

- разработано обобщенное математическое описание технологических процессов, протекающих при сушке растительных материалов с сопутствующим вибрационным измельчением, позволяющее определить время получения пищевых порошков и скорость процесса;

- выявлены пути интенсификации процессов переработки растительного сырья, получены рациональные режимные параметры сушки, смещения и измельчения.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием фундаментальных законов теоретической механики, тепло- и массообмена при испарении жидкости, общепринятыми методами экспериментальных исследований, а также сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Практическая ценность. В результате комплексного исследования технологических процессов сушки растительных материалов с сопутствующим измельчением при получении пищевых порошков разработаны:

- новый способ получения пищевых порошкообразных продуктов из растительного сырья (патент РФ № 2064477);

- новые конструкции сушильного оборудования, а также конструктивные рекомендации, направленные на улучшение качества высушиваемого материала, новизна конструкций подтверждена патентами (патенты РФ № 2229340, 2413577, свидетельство на полезную модель № 14649).

- рациональные технологические режимы ведения сушки растительных материалов с сопутствующим вибрационным измельчением; технологические схемы переработки растительного сырья в пищевые порошкообразные продукты;

- экспериментальные установки и методики исследований кинетики сушки, смещения и измельчения растительного сырья.

Реализация работы. Результаты проведенных в работе исследований реализованы при создании конструкторских решений, методик расчета, конструкторской документации на стадии рабочих чертежей, паспортов и инструкций по эксплуатации. На техническую документацию имеется заключение регионального отделения санэпиднадзора и НПО «Пищепромпроектмаш». Внедрение аппаратов для сушки и измельчения растительного сырья осуществлено на предприятиях ОАО «Казанский завод продовольственных товаров», ООО «Ремтех», ОАО «Таткрахмалпатока».

На порошки из растительного сырья разработаны технические условия ТУ 9164-001-2069635-93 «Порошки пищевые растительного происхождения», получен гигиенический сертификат № 478358 от лаборатории на основании протокола анализа качества порошков в лаборатории СЭС.

Разработанные экспериментальные установки, методики и результаты исследований внедрены в учебный процесс в рамках курсов «Технология сушки» и «Технологическое оборудование отрасли».

Основные положения, выносимые на защиту. Решение проблемы, состоящей в создании ресурсо- и энергосберегающих технологий и аппаратного оформления процессов сушки растительного сырья при пониженном давлении с одновременным измельчением, на основе режимных параметров и конструктивных характеристик, полученных в результате расчета обобщенного математического описания, а именно:

- способы получения пищевых порошков из растительного сырья совмещением процессов сушки и измельчения в аппаратах вибрационного типа;
- механизм послынного движения загрузки в вибрационном аппарате, позволяющий проводить процесс измельчения растительного сырья в рациональных режимах;
- математические зависимости определения времени пребывания материала в вибрационном аппарате от его режимных параметров;
- параметры вибрации, обеспечивающие максимальную скорость циркуляции перерабатываемого материала в вибрационном аппарате; математическая зависимость определения времени контакта перерабатываемого материала с вибрирующим корпусом;
- результаты экспериментальных исследований кинетики процессов сушки при пониженном давлении и вибрационном воздействии и кинетики измельчения растительного сырья при производстве пищевых порошков;
- результаты экспериментальных исследований коэффициента внешнего трения для различного растительного сырья в зависимости от влажности образца, необходимые для расчета затрат мощности; математические зависимости затрат мощности на перемешивание загрузки в зависимости при проведении процессов сушки и измельчения; результаты экспериментальных исследований затрат мощности в зависимости от различных режимных параметров процессов;
- обобщенное математическое описание технологических процессов, протекающих при сушке растительных материалов с одновременным вибрационным измельчением;
- конструкции аппаратов получения пищевых порошков из растительного сырья совмещением сушки и вибрационного измельчения в режиме интенсивной циркуляции загрузки;
- усовершенствованные технологические схемы получения пищевых порошков из растительного сырья и режимы переработки растительного сырья в пищевые порошкообразные продукты;
- экспериментальные установки и методики исследований кинетики сушки, смешения и измельчения растительного сырья.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на:

Международной научно-технической конференции: «Холод и пищевые производства», С.Петербург, 1996; на Межрегиональных научно-практических конференциях «Пищевая промышленность-2000» Казань, 1996, 1998; на Международной научно-технической конференции «Ресурсосберегающие технологии пищевых производств» С.Петербург, 1998; на Международной конференции «Методы кибернетики химико-технологических процессов», Москва – Казань - Уфа, 1999; на конференции молодых ученых «Пищевые технологии и биотехнологии», Казань, 1998 - 2010; на совместном заседании президиума АН РТ и коллегии министерства и продовольствия РТ, Казань, 1996; на IV Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научный потенциал студенчества в XXI веке» г. Ставрополь, 2010; на III научно-практической конфе-

ренции с международным участием «Современное состояние и перспективы развития пищевой промышленности и общественного питания», Челябинск, 2010; на II Международной научно-технической конференции «Новое в технике и технологии пищевых производств», Воронеж, 2010; на XXIII Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-23», Саратов, 2010; на 3-ей Всероссийской научно-практической конференции «Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности», Бийск, 2010; на V научно-практической конференции молодых ученых, Магнитогорск, 2010; на Международном научно-техническом семинаре «Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов», Воронеж, 2010.

Результаты работы экспонировались на биотехнологической выставке «РосБиоТех» в Москве (2009, 2010). На этой выставке установка вибрационной сушилки-мельницы удостоена серебряной медали (2009), а способ получения пищевых порошков золотой медали (2010).

Публикации. По результатам выполненных исследований автором опубликовано 76 печатных работ, в том числе 14 статей в ведущих рецензируемых журналах и 5 патентов.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы и приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, ее научная и практическая значимость, сформированы цели и задачи исследований и дан краткий обзор содержания диссертации.

В первой главе изложен методологический подход к исследованию технологических процессов, протекающих при сушке растительного сырья с сопутствующим измельчением с получением пищевых порошков, исследование свойств растительного сырья, как объекта сушки. На основании анализа химического состава, строения, питательной ценности, полезных свойств различных классов растительного сырья и широты применения как компонентов пищи произведен выбор необходимых и ценных представителей этих классов как объектов исследования. Выполнен обзор различных способов хранения растительного сырья, показаны их преимущества и недостатки. Представлен новый способ получения порошков из растительного сырья, при котором процесс сушки проводится с применением внешнего подогрева при сопутствующем измельчении и смешении в аппаратах вибрационного типа. Измельчение продукта в процессе сушки мелющими телами, загружаемыми в аппарат, постоянно обновляет поверхность испарения со свободной влагой, обеспечивая первый период сушки на все время процесса, а также исключает налипание частиц загрузки на греющую поверхность. Вибрационное перемешивание всей загрузки способствует выравниванию температуры и влажности во всем объеме загрузки и интенсификации теплообмена. Вакуумирование позволяет исключить перегрев материала, обеспечивая сохранение всех качеств исходного продукта. При этом для поддержания температуры высушиваемого материала производится подвод тепла через нагретую поверхность, компенсирующий теплоту парообразования и различные потери тепла. Непрерывный отсос паров испарившейся влаги поддерживает постоянный градиент концентрации влаги в аппарате.

Предложена конструкция вибрационной вакуумной сушилки – мельницы периодического действия, в которой реализован представленный способ получения порошков из растительного сырья (рис.1). Горизонтальный цилиндрический корпус с центральной

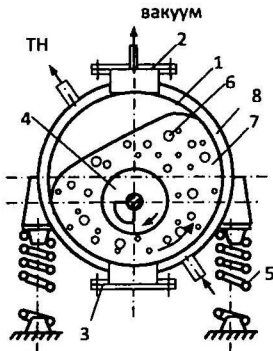


Рис.1. Вибро-вакуумная сушилка-мельница: 1- корпус; 2, 3- крышка загрузочного и выгрузочного люков; 4- вибратор; 5- упругая опора; 6- мелющие тела; 7- обрабатываемый материал; 8- теплообменная рубашка.

быточной загрузкой аппарата из расходного бункера за счет естественного подпора столба подготовленного сырья и поддержания начального коэффициента заполнения аппарата, равного единице. Разработана конструкция вибрационной сушилки-мельницы непрерывного действия, которая состоит из корпуса, представляющего собой горизонтальный барабан (рис.2), имеющий теплообменную рубашку для прохода сушильного агента.

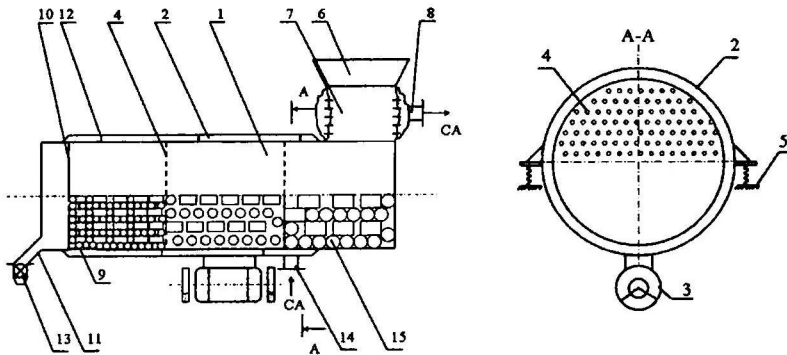


Рис.2. Вибрационная сушилка-мельница непрерывного действия. 1 – корпус; 2 – теплообменная рубашка; 3 – инерционный вибратор; 4 – перегородки секций; 5 – упругие опоры; 6 – загрузочный бункер; 7 – загрузочный рукав; 8 – патрубок отвода сушильного агента; 9 – мелющие тела; 10 – торцевая стенка корпуса; 11 – выгрузочный патрубок; 12 – штуцер подачи; 13 – затвор сушильного агента.

Сушильный агент подается в теплообменную рубашку и, равномерно по всей поверхности нагревает корпус барабана, а, дойдя до перфорированной зоны последней сек-

трубой, в которой размещен на подшипниках вал двухмассного инерционного вибратора, установлен на упругих опорах.

Вибратор вращается от электродвигателя через гибкую муфту. Корпус вибросушилки снабжен рубашкой для подачи в нее теплоносителя (ТН). Подготовленное сырье загружается через верхний люк, крышка люка плотно закрывается и включается система вакуумирования. В рубашку подается теплоноситель, и температура в аппарате доводится до заданного значения. После этого включается привод сушилки и начинается процесс сушки материала.

Одним из направлений интенсификации технологических процессов является переход от периодического к непрерывному производству. При этом предложено интенсифицировать теплообмен комбинацией контактного и конвективного подвода тепла к объекту сушки при интенсивном перемешивании последнего, а также из-

ции барабана, попадает внутрь последнего – в зону конвективного теплообмена. Сушильный агент, пройдя через перфорированные перегородки секций, попадает в первую секцию, полностью заполненную исходным влажным продуктом, где предварительно нагревает его и полностью очищается от уносимой мелкой фракции готового порошка, которая налипает на влажную поверхность частиц исходного продукта при прохождении через пространство между частицами сырья. Очищенный, охлажденный и насыщенный парами влаги сушильный агент удаляется. Готовый сухой порошок удаляется через перфорированную торцевую стенку последней секции, выгрузочный люк и затвор.

Комплексные лабораторные и промышленные испытания проведены на установках объемом 0.4 и 200 литров, получены порошки из различных видов растительного сырья (корнеплоды, ягоды, травы).

Изложение первой главы завершается постановкой основных задач исследования.

Во второй главе изложены результаты экспериментальных и теоретических исследований перемешивания в вибрационных аппаратах. При анализе процессов тепло- и массообмена в аппаратах вибрационного типа, главным фактором, определяющими теплообмен в этих системах, является подвижность, циркуляция и измельчение виброкипящего слоя дисперсного материала.

Для описания характера потока потока внутри вибрационного аппарата непрерывного действия используется предложение об аналогии процесса перемешивания процессу вибротранспорта и прохождению упругой волны между слоями загрузки (диффузия, осевое и радиальное смешение). Для расчета аппаратов с неидеальным движением потока применяют диффузионную модель. Процесс осевого смешения при постоянной интенсивности перемешивания описывается уравнением Фика:

$$\frac{d\bar{c}}{d\tau} = -\bar{D} \frac{d^2\bar{c}}{dx^2} \quad (1)$$

где \bar{D} – эффективный коэффициент перемешивания.

Параметром, однозначно характеризующим осевое смешение, является эффективный продольный критерий Пекле:

$$Pe = \frac{vL}{D} \quad (2)$$

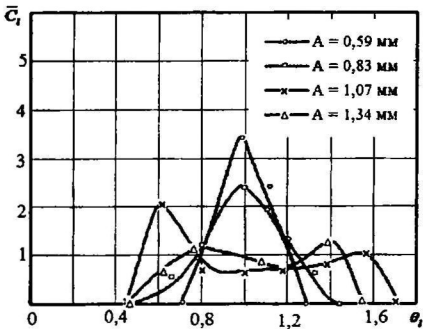


Рис. 3. Кривые отклика на импульсное возмущение при $K_3 = 0,5$, $\omega = 367 \text{ рад/с}$

Проведены экспериментальные исследования времени пребывания материала в вибрационном аппарате непрерывного действия при различных режимах параметров аппарата методом «черного ящика» (рис.3). Характер С-кривых и расчетные значения критерия Пекле на различных режимах работы аппарата показали, что поток материала в аппарате описывается диффузионной моделью, занимающей промежуточное место между реактором идеального вытеснения и реактором идеального смешения.

В результате проведения полного факторного эксперимента определены оптимальные рабочие параметры по времени пребывания материала в аппарате.

Обработкой экспериментальных данных по исследованию кинетики смешения методом Брандона найдены уравнения зависимости среднего времени пребывания, производительности и средней скорости движения материала в корпусе от рабочих параметров.

$$\tau^* = (-339,49 + 689,44k_{zan} + 432,33k_{zan}^2) \times (3,74 - 4,02A + 1,38A^2) \times (3,27 - 0,01\omega)$$

$$\bar{Q} = 1,6(2111,37 - 1905,79k_{zan} - 157,81k_{zan}^2) \times (-1,49 + 4,56A - 1,87A^2) \times (-2,61 + 0,01\omega)$$

$$\bar{W}_L = 1,01(30,96 - 54,93k_{zan} + 24,36k_{zan}^2) \times (-1,107 + 3,84A - 1,35A^2) \times (1,06 - 0,002\omega)$$

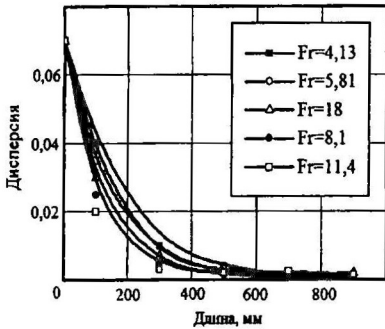


Рис. 4. Кинетические кривые вибрационного смешения

рах смесителя периодического действия, лежащих в пределах : $k_{zan} = 0,5 - 0,7$; $A = 0,6 - 0,83$ мм; $\omega = 367$ рад/с, что соответствует значениям критериев параметрического $П_1 = \frac{A}{D} = (5 + 7) \cdot 10^{-3}$ и Фруда $Fr = \frac{A\omega^2}{g} = 8 \div 11$.

Значения критерия Фруда для непрерывного вибрационного смесителя соответствует интервалу, найденному для периодических вибрационных смесителей. Параметрический критерий $П_1$ увеличивается по сравнению с рекомендуемыми для периодических смесителей примерно в 1,7 раз, что объясняется разницей в траектории движения загрузки внутри корпуса, когда появляется составляющая скорости движения загрузки вдоль корпуса от входа к выходу, что приводит траекторию циркуляции загрузки к спиральной форме, увеличивая путь движения загрузки.

Было исследовано движение мелющей загрузки в помольных камерах вибрационных аппаратов, являющееся наименее изученным. Это связано, с одной стороны, с наличием нескольких сотен мелющих тел, одновременно находящихся в движении и взаимодействующих друг с другом, и с другой стороны, замкнутостью объема помольных камер, что значительно усложняет или делает невозможным измерение динамических параметров загрузки. Как правило, исследуют движение мелющей загрузки в течение большого количества времени, однако, главное значение имеет процесс, происходящий за один оборот вала вибратора. За 1 секунду происходит около 50 оборотов, а весь процесс помола будет состоять из нескольких десятков тысяч циклов. Именно этот малый цикл определяет характер помола.

Рассмотрим расчетную схему. Координаты любой точки аппарата (рис.5) в подвижной системе координат oxy и неподвижной системе координат $o'\xi\eta$ связаны равенствами:

Данные зависимости были проверены на адекватность сравнением расчетных и табличных значений критериев Фишера. В результате получена удовлетворительная сходимость экспериментальных и расчетных данных.

По полученным уравнениям можно выбрать параметры вибрации для данных габаритов корпуса, позволяющие обеспечить время пребывания, требуемое для сушки сырья с различной начальной влажностью до требуемой конечной, при соответствующей производительности.

Анализ кинетических кривых (рис.4), полученных в результате экспериментальных исследований, показал, что наилучшее перемешивание имеет место при рабочих параметрах

$$\begin{aligned}\xi &= \xi_0(\tau) + x \\ \eta &= \eta_0(\tau) + y\end{aligned}\quad (3)$$

где ξ_0 , η_0 - координаты начала системы отсчета оху относительно неподвижной системы $o'\xi'\eta'$.

Начало системы отсчета ξ_0 (и все точки корпуса аппарата) совершает поступательное движение по закону

$$\begin{aligned}\xi_0(\tau) &= \xi_0^H + f_x(\tau) \\ \eta_0(\tau) &= \eta_0^H + f_y(\tau)\end{aligned}\quad (4)$$

где $\xi_0^H = \xi_0(0)$, $\eta_0^H = \eta_0(0)$, $f_x(\tau)$, $f_y(\tau)$ - закон, по которому совершает движение корпус аппарата.

Как правило, на практике, применяются режимы работы аппарата с круговой траекторией колебаний его корпуса по закону

$$\begin{aligned}f_x(\tau) &= A \sin \omega \tau \\ f_y(\tau) &= A(\cos \omega \tau - 1)\end{aligned}\quad (5)$$

Проекции скоростей в обеих системах отсчета определяются равенствами:

$$\begin{aligned}v_\xi^i &= \frac{d\xi_i}{d\tau}, v_\eta^i = \frac{d\eta_i}{d\tau} \\ v_x^i &= \frac{dx_i}{d\tau}, v_y^i = \frac{dy_i}{d\tau}\end{aligned}$$

Здесь индекс i индивидуализирует конкретный шар.

Равенства (3), (4), (5) позволяют установить связь между скоростями шара и частицы жидкой фазы относительно неподвижной системы отсчета $o'\xi'\eta'$ и относительно подвижной системы отсчета $оху$.

$$\begin{cases} v_\xi^i = v_x^i - A\omega \cos \omega \tau \\ v_\eta^i = v_y^i + A\omega \sin \omega \tau \end{cases}\quad (6)$$

где v_ξ^i , v_η^i - проекции скорости шара на оси $o'\xi'$ и $o'\eta'$;

v_x^i , v_y^i - проекции скорости шара на оси $ох$ и $оу$.

Запишем уравнения Ньютона, описывающие движение шара относительно корпуса аппарата:

$$\begin{aligned}m_i \frac{dv_x^i}{dt} &= -m_i A \omega^2 \sin \omega t + F_x^i, \\ m_i \frac{dv_y^i}{dt} &= -m_i g - m_i A \omega^2 \cos \omega t + F_y^i\end{aligned}\quad (7)$$

где F_x^i , F_y^i - проекции сил взаимодействия шаров на подвижные оси координат $ох$ и

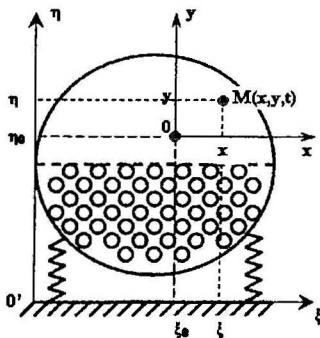


Рис. 5. Расчетная схема движения вибрирующего корпуса с нагрузкой

оу, связанные с проекциями F_{ξ}^i, F_{η}^i известными равенствами.

Отметим, что в неинерциальной системе отсчета oxy , наряду с силой тяжести, появляются слагаемые $-m_i A \omega^2 \sin \omega t$, $-m_i A \omega^2 \cos \omega t$, которые рассматриваются как проекции силы инерции на оси ox и oy .

Дифференциальные уравнения (7) необходимо решать с учетом начальных условий, сформулированных для каждого индивидуального шара

$$\begin{aligned} x^i &= x^i(\tau_n^i), & v_x^i &= v_x^i(\tau_n^i), \\ y^i &= y^i(\tau_n^i), & v_y^i &= v_y^i(\tau_n^i), \end{aligned} \quad \text{при } \tau = \tau_n^i \quad (8)$$

где τ_n^i - начальное время, начиная с которого конкретный i -ый шар начинает двигаться относительно корпуса аппарата.

Таким образом, прежде чем приступить к решению уравнений (7), необходимо решить задачу об определении времени начала движения конкретного шара τ_n^i для чего проведем качественный анализ поведения шаров в аппарате.

В подвижной системе отсчета oxy на все шары действует сила тяжести $|\vec{F}_m| = m_i g$ и сила инерции $|\vec{F}_{ин}| = m_i A \omega^2$, направленная противоположно направлению \vec{a}_k .

Рисунок 6 наглядно показывает, что относительно корпуса аппарата движется лишь слой шаров находящихся выше линии AC параллельной направлению действия сил инерции и тяжести $F_{ин} + F_m$, где точка А крайняя левая точка свободной поверхности АВ массива шаров. Все шары ниже линии AC будут оставаться неподвижными относительно корпуса аппарата. В дальнейшем равнодействующая сил инерции и тяжести $F_{ин} + F_m$ меняет свое направление, и новые слои шаров включаются в движение. При $\omega t > \pi$ уже весь массив шаров движется относительно корпуса аппарата.

Слой шаров, находящихся на линии AC, приходят в движение когда, в предельном случае, линия AC совпадает с направлением вектора $F_{ин} + F_m$. На практике β_i чуть меньше.

Учитывая, что

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \beta_i &= \frac{-m_i g - m_i A \omega^2 \cos \omega \tau_n^i}{m_i A \omega^2 \sin \omega \tau_n^i}, \\ \beta_i &= \pi - \alpha_i, \end{aligned}$$

получаем уравнение, служащее для определения начального времени τ_n^i для i -го слоя шаров.

$$N + \cos \tau_n^i + \operatorname{tg} \alpha_i \sin \tau_n^i = 0 \quad (9)$$

$$\text{где } N = \frac{g}{A \omega^2}$$

Таким образом, задавая значения α_i из (9), определяется время τ_n^i когда начинает двигаться относительно корпуса аппарата слой, лежащий на линии AD, имеющий соответствующий угол α_i . Уравнение (9) показывает, что в момент времени $\omega t = \pi$ последний

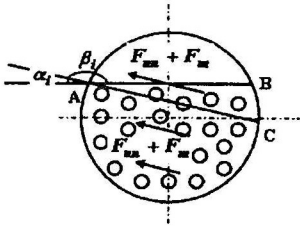


Рис.6. Схема действия сил

слой шаров ($\alpha_i = \frac{\pi}{2}$) отделяется от корпуса и вместе со всем массивом шаров начинает перемещаться вправо.

Особенностью такого послыжного режима движения шаров является то, что каждый последующий слой начинает двигаться позже предыдущего и поровый объем в массиве шаров при таком движении увеличивается во времени по сравнению с пористостью неподвижного слоя. При таком движении взаимодействие шаров между собой незначительно, так как они находятся во взвешенном состоянии. Из вышесказанного следует, что в уравнениях движения (7) мы можем пренебречь вкладом сил взаимодействия между шарами (F_x^i, F_y^i)

Для удобства решения поставленной задачи введем безразмерные величины равенствам:

$$\bar{x} = \frac{x}{A}, \quad \bar{y} = \frac{y}{A}, \quad \bar{\tau} = \omega \tau, \quad u_x^i = \frac{v_x^i}{A\omega}, \quad u_y^i = \frac{v_y^i}{A\omega}, \quad N^* = \frac{g}{A\omega}$$

В новых переменных уравнения движения примут вид:

$$\begin{aligned} \frac{du_x^i}{d\bar{\tau}} &= -\sin \bar{\tau}, \\ \frac{du_y^i}{d\bar{\tau}} &= -N^* - \cos \bar{\tau} \end{aligned} \quad (10)$$

Начальные условия (8) преобразуются к виду

$$\begin{aligned} \bar{x}^i &= \bar{x}_0^i, \quad u_x^i = u_{x0}^i, \\ \bar{y}^i &= \bar{y}_0^i, \quad u_y^i = u_{y0}^i, \end{aligned} \quad \text{при } \bar{\tau} = \bar{\tau}_n^i \quad (11)$$

Интегрируя (10) дважды, с учетом начальных условий (11) получим

$$\begin{cases} u_x^i = u_{x0}^i + \cos \bar{\tau} - \cos \bar{\tau}_n^i \\ u_y^i = u_{y0}^i - \sin \bar{\tau} + \sin \bar{\tau}_n^i - N^*(\bar{\tau} - \bar{\tau}_n^i) \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \bar{x}^i = x_0^i + (u_{x0}^i - \cos \bar{\tau}_n^i)(\bar{\tau} - \bar{\tau}_n^i) + \sin \bar{\tau} - \sin \bar{\tau}_n^i \\ \bar{y}^i = \bar{y}_0^i + (u_{y0}^i + \sin \bar{\tau}_n^i)(\bar{\tau} - \bar{\tau}_n^i) + \cos \bar{\tau} - \cos \bar{\tau}_n^i - \frac{N^*}{2}(\bar{\tau} - \bar{\tau}_n^i)^2 \end{cases} \quad (13)$$

Расчет по формулам (12), (13) проводится при $u_{x0}^i = u_{y0}^i = 0$ (все шары при $\bar{\tau}(\bar{\tau}_n^i)$ находятся в покое) до тех пор, пока шар, находящийся в момент начала движения в верхнем нулевом слое в крайне правом положении, после отделения от корпуса аппарата в точке В при некотором времени $\bar{\tau}_\kappa$ не коснется вновь корпуса аппарата. В этот момент времени весь верхний (нулевой $i = 0$) слой шаров, находящихся слева от этого контрольного шара останавливается относительно корпуса аппарата и начиная с $\bar{\tau}(\bar{\tau}_\kappa)$ начинается качественно новое движение шаров.

Мелющие тела при этом находятся во взвешенном состоянии, а в зазор между корпусом и шарами попадает измельчаемое сырье (рис.7). Полет всей массы шаров продолжатся до того момента, когда шар, соответствующий точке A_0 , не столкнется с корпусом. В момент удара первого шара о корпус с определенной силой, он приобретает новое ускорение противоположное ей. Однако двигаться в этом направлении шару мешает масса шаров,

движущаяся с такой же силой в направлении корпуса.

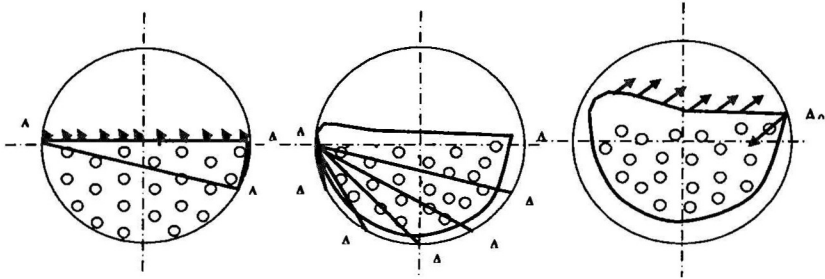


Рис. 7. Механизм послойного движения мелющих шаров

Тогда вся масса шаров послойно обрушивается в первоначальное положение, истирая и раздавливая при этом измельчаемое сырье, и движение начинается заново, согласно вышеизложенной схеме.

Результаты исследований механики движения шаров наглядно показали, что процесс измельчения материала в помольной камере при резонансном режиме работы мельницы происходит за счёт:

- истирания о внутреннюю стенку при циркуляции загрузки относительно неподвижной камеры, за счет затаскивания материала в образованный зазор между мелющими телами и корпусом;
- истирания материала между шарами, за счет чередования взвешенного состояния шаров и плотного соприкосновения;
- высокочастотного ударного воздействия шаров с малыми амплитудами колебаний на материал, попавший в зазор между корпусом и шарами, при обрушении последних.

Послойное движение массива мелющих шаров объясняется изменением направления силы инерции, меняющейся в соответствии с направлением движения дебаланса вибрационного аппарата. Результаты расчета позволяют определить размер зазора между загрузкой и корпусом аппарата и, соответственно, выбрать начальный размер частиц измельчаемого материала при соответствующей амплитуде колебаний для более эффективного измельчения.

Было исследовано взаимодействие вибрирующего корпуса с перерабатываемым материалом. Для выяснения причин движения материала относительно вибрирующей поверхности необходимо рассмотреть динамическое равновесие частицы весом G , находящейся на этой поверхности. На рис.8. приведена схема действия сил между частицей и колеблющейся поверхностью смесителя. На частицу кроме веса действует центробежная сила P , направленная по радиусу вращения:

$$P = \frac{G}{g} A \omega^2 \quad (14)$$

В плоскости соприкосновения частицы с корпусом развивается сила трения F , направленная вдоль касательной к поверхности в сторону, противоположную относительной скорости v_x :

$$F = f(G \cos \alpha - P_n) \quad (15)$$

где P_n - нормальная к поверхности корпуса (касательной) составляющая центро-

бежной силы; α - угол наклона между касательной к поверхности и горизонтом.

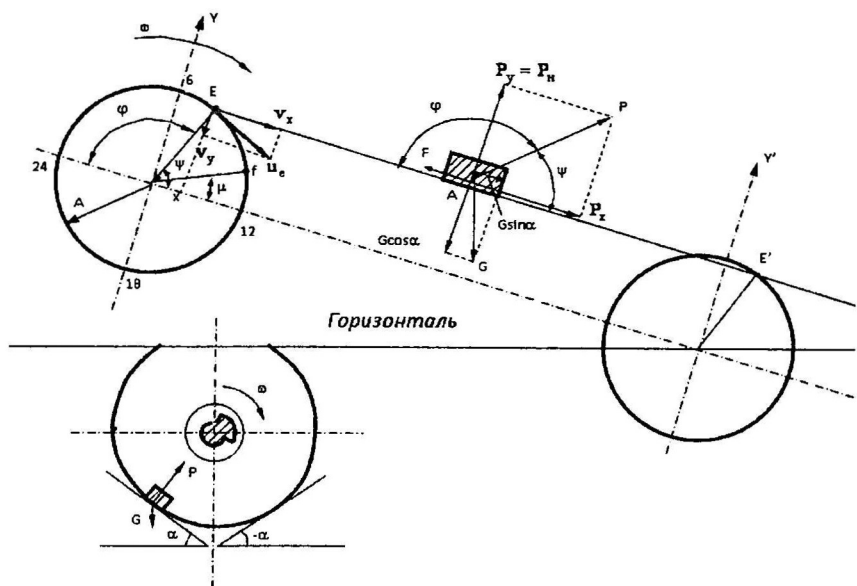


Рис. 8. Схема сил взаимодействия загрузки с корпусом вибросмесителя

Равновесие частицы относительно корпуса нарушается при условии:

$$(G \sin \alpha + P_x) \geq F \text{ или } (G \sin \alpha + P_x) \geq f(G \cos \alpha - P_n) \quad (16)$$

Подставив значения P_x и P_n и сделав некоторые преобразования, можно найти угол поворота дебалансов в момент начала движения материала:

$$(\cos \varphi_k - f \sin \varphi_k) = -\frac{g}{A\omega^2} (f \cos \alpha - \sin \alpha) \quad (17)$$

где φ_k - искомый угол поворота.

Имея в виду, что $f = \frac{\sin \mu}{\cos \mu}$ можно условие (17) записать как:

$$\cos(\varphi_k + \mu) = -\frac{I_k}{A\omega^2} = -k' \quad (18)$$

где I_k - ускорение отрыва при прямом скольжении

$$I_k = g \sin(\mu - \alpha) \quad (19)$$

k' - коэффициент прямого скольжения

$$k' = \frac{I_k}{A\omega^2} = \frac{g \sin(\mu - \alpha)}{A\omega^2} \quad (20)$$

В зависимости от соотношения сил F , P_x , $G \sin \alpha$ скольжение материала может быть прямым и обратным. А соотношение сил P_n и $G \sin \alpha$ определяет условие отрыва материала от рабочей поверхности машины. Из соотношения сил, действующих на мате-

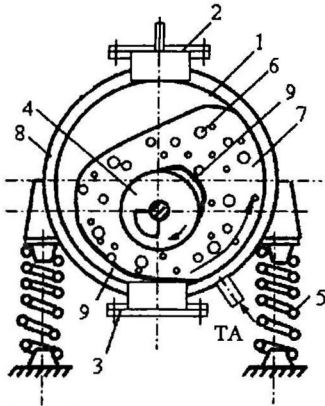


Рис.9. Вибрационная сушилка-мельница: 1 - корпус; 2, 3- крышка загрузочного и выгрузочного люков; 4- вибратор; 5- упругие опоры; 6- мелющие тела; 7- обрабатываемый материал; 8- теплообменная рубашка; 9 - серповидные зазоры; ТА - телловой агент.

то есть при колебаниях корпуса по загрузке проходят упруго-вязкие волны. В результате колебания частиц и их соударения появляется взвешенное состояние загрузки. Кроме колебаний вся масса загрузки в вибросмесителе циркулирует вокруг центра тяжести загрузки с угловой скоростью, значительно меньшей угловой скорости колебаний камеры.

Циркуляция загрузки складывается из полетов и скольжений ее относительно корпуса - режим с подбрасыванием. Наличие серповидных зазоров между загрузкой и корпусом (рис.9) показывает взаимодействие их в данной точке поверхности лишь часть периода колебаний.

На рис.10 представлена траектория движения точки а корпуса вибросмесителя, а также диаграмма скоростей корпуса (v_x и $v_y = v_n$) и загрузки, взаимодействующей с корпусом (u_x и u_n). Скорости корпуса и загрузки направлены по касательной и нормали к поверхности в этой точке. Скоростные диаграммы показывают теоретически возможный вариант совместного движения загрузки с корпусом (оq), обратного скольжения (qd), прямого скольжения (bm). В точке d наступает равновесие $Ps \sin \omega t \geq G$, то есть условие отрыва массы от рабочей поверхности. После некоторых преобразований получено условие и угол отрыва φ_d массы с учетом угла наклона касательной α :

$$mA\omega^2 \sin(\varphi_d - \alpha) \geq mg \cos \alpha \quad (21)$$

Отсюда $\varphi_d \geq \arcsin \frac{\cos \alpha}{Fr} + \alpha$, где $Fr = \frac{A\omega^2}{g}$ - критерий Фруда.

При $\alpha=0$ частица находится внизу, касательная горизонтальна, тогда $\sin \varphi_d = \frac{1}{Fr}$.

Угол отрыва меняется от 0 до угла естественного откоса, значение критерия Фруда меняется соответственно от ∞ до 1. Для значений $Fr = 6 \div 14$ условия отрыва частиц внизу корпуса создаются при малых углах $\varphi_d = 4 \div 10^\circ$. Частицы, находящиеся у корпуса с $\alpha = 0 \div 90^\circ$,

риал, можно установить, что движение последнего относительно рабочего органа аппарата определяется параметрами вибрации (A , ω) и коэффициентом внешнего трения его по поверхности контакта.

Нужно отметить, что при работе машин с отрывом материала от рабочей поверхности увеличивается расход энергии на преодоление сопротивлений, возникающих при встрече материала с корпусом. Величина этих сопротивлений пропорциональна кинетической энергии соударения загрузки и корпуса и коэффициенту трения между ними.

Для движения материала в аппарате и сохранения заданных параметров вибрации корпуса расходуется энергия, передача которой от корпуса к загрузке производится следующим образом. При движении корпуса вибросмесителя частицы, непосредственно соприкасающиеся с корпусом, получают ударный импульс и передают его более отдаленным слоям,

отрываются только при $\varphi_d = \pi/2$, то есть до угла $\pi/2$ частицы двигаются вместе с корпусом до точки отрыва.

Оптимальный угол полета для вибросмесителей будет определяться из условия максимальной кинетической энергии соударения загрузки с рабочим органом. Углом полета δ (рис.10) называется угол поворота дебаланса с момента отрыва частицы (т.д) до встречи с рабочей поверхностью корпуса (т.б).

Кинетическая энергия частицы равна

$$T = \frac{G}{g} \frac{v_y'^2}{2} \quad (22)$$

где v_y' - абсолютная скорость соударения частицы с рабочим органом, нормальная к его поверхности.

$$v_y' = u_n + v_n \quad (23)$$

$$u_n = g \tau \quad (24)$$

$$v_n = \omega A \sin\left(\omega \tau - \frac{\pi}{2}\right) \quad (25)$$

Подставив эти значения в (23), можно получить

$$v_y' = g \tau + \omega A \sin\left(\omega \tau - \frac{\pi}{2}\right) \quad (26)$$

где u_n - скорость падения частицы; v_n - нормальная составляющая скорости корпуса.

Максимальная кинетическая энергия соответствует максимальной относительной скорости, которая определяется из условия $\frac{dv_y'}{d\tau} = 0$.

$$\frac{dv_y'}{d\tau} = g + A \omega^2 \cos\left(\omega \tau - \frac{\pi}{2}\right) = 0 \quad (27)$$

Окончательно время полета загрузки от отрыва до встречи с корпусом будет равно

$$\tau_n = \frac{1}{\omega} \arccos\left(-\frac{g}{A \omega^2}\right) + \frac{\pi}{2} \quad (28)$$

При известном периоде колебания корпуса $T = 2\pi/\omega$, можно найти на траектории колебания корпуса точку встречи загрузки с ним с максимальной скоростью

$$h = \frac{\tau_n}{T} = \frac{1}{2\pi} \left(\arccos\left(-\frac{g}{A \omega^2}\right) + \frac{\pi}{2} \right) = \frac{\arccos\left(-\frac{g}{A \omega^2}\right)}{2\pi} + \frac{1}{4} \quad (29)$$

Расчет точки встречи h при различных значениях соотношения $\frac{g}{A \omega^2}$ показывает,

что изменение угла колебания в пределах $\frac{g}{A \omega^2} = 0.125 \div 0.04$ не превышает 5%.

Проведенные экспериментальные исследования позволили подтвердить оптимальные значения параметров вибрации, обеспечивающих максимальную передачу энергии от корпуса к загрузке и максимальную скорость циркуляции. Таким образом, можно установить оптимальный диапазон изменения критерия Фруда, соответствующий максимальной скорости циркуляции: $Fr = 8 \div 11$.

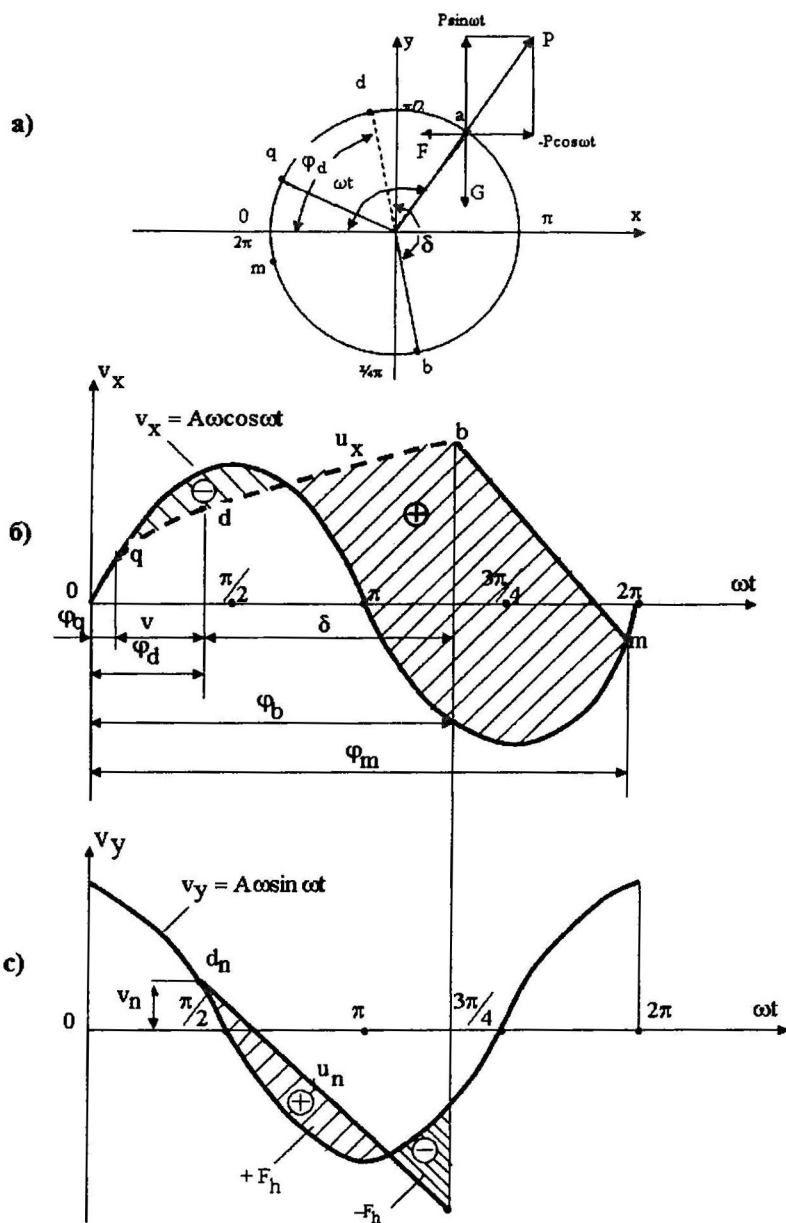


Рис. 10. Диаграмма скоростей корпуса и загрузки

На скорость циркуляции значительное влияние оказывает коэффициент внешнего трения загрузки о материал корпуса, на величину которого, в свою очередь, оказывает влияние влажность материала. Увеличение жидкой фазы в смеси ведет к снижению скорости циркуляции с 3.2 л/с для составов с 15% жидкой фазы до 2.3 л/с для 22.5% и полное отсутствие циркуляции при 25% и выше.

Скорость циркуляции загрузки ω^* зависит от соотношения угла наклона касательной к корпусу и угла внешнего трения загрузки. Эти параметры определяют соотношение сил трения и касательной составляющей веса загрузки. Оптимальное соотношение линейных скоростей движения корпуса и загрузки (циркуляции) имеет вид:

$$\frac{A\omega}{R\omega^*} = 2c \quad (30)$$

Для вибрационных смесителей c меняется в пределах $0 \div 0.785$ для значений $Fr = 1 \div 10$. С увеличением числа Фруда более 10 значение c не меняется. Отсюда можно найти соотношение параметра вибрации A с габаритами смесителя в виде параметрического критерия Π_1 :

$$\Pi_1 = \frac{A}{D} = \frac{\omega^*}{\omega} c \quad (31)$$

Учитывая пределы изменения максимальной скорости циркуляции для материалов различной влажности при значении критерия Фруда 10, величина параметрического критерия изменяется в диапазоне $\Pi_1 = (5 \div 7) 10^{-3}$ независимо от габаритов смесителя, сохраняя при этом максимальную скорость циркуляции загрузки.

На основе анализа литературы по теории взаимодействия загрузки и рабочего органа

вибрационных машин, а также проведенных исследований, установлены режимы работы вибрационных машин по форме взаимодействия рабочего органа с сыпным материалом, находящимся в свободном состоянии. Для теоретического обоснования и практических расчетов вибрационных сушилок-мельниц выбран режим работы с подбрасыванием загрузки, обеспечивающий максимальную скорость циркуляции, характерный для вибросмесителей.

Определены оптимальные интервалы параметров вибрации корпуса вибросмесителя (амплитуды и частоты

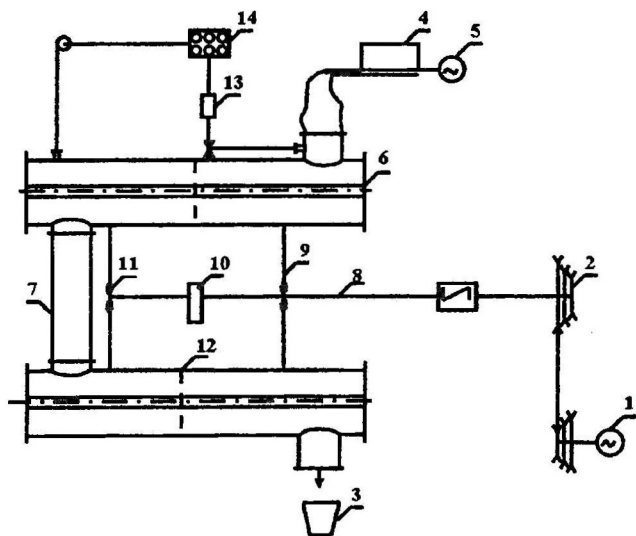


Рис.11. Лабораторная вибрационная сушилка-мельница непрерывного действия: 1 - электродвигатель; 2 - привод; 3 - приемная чаша; 4 - загрузочный бункер; 5 - привод питателя; 6 - корпус; 7 - рукав; 8 - вал вибратора; 9 - стойки; 10 - дебаланс; 11 - упругие опоры; 12 - перегородки; 13 - конденсатор; 14 - калорифер.

колебаний), при которых максимальны поверхность и время контакта загрузки с корпусом за один период колебания при максимальной скорости перемешивания.

Учитывая совмещение процессов сушки, смешения и измельчения в одном аппарате, циркуляция загрузки имеет определяющее значение, обеспечивающее интенсивный теплообмен между нагретой поверхностью и загрузкой, перемешивание частиц с различной температурой и влажностью во всём объёме загрузки и исключение локальных нагревов.

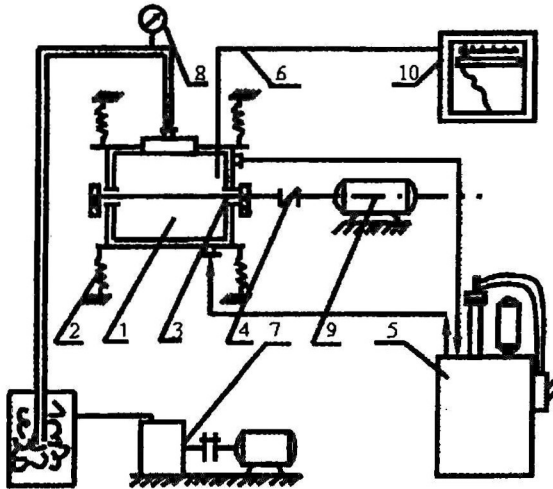


Рис. 12. Лабораторная сушилка-мельница периодического действия: 1 – корпус, 2 – упругие опоры, 3 – вал вибратора, 4 – гибкая муфта, 5 – термостат, 6 – термопара, 7 – вакуум – насос, 8 – вакуумметр, 9 – электродвигатель, 10 – потенциометр, 11 – кран – воздушник.

В главе 3 представлен комплекс экспериментальных исследований по измельчению различных видов растительного сырья различной влажности при различных режимах вибрации на разработанных лабораторных установках периодического и непрерывного действия (рис.11, 12).

Анализ полученных экспериментальных кинетических кривых непрерывного измельчения позволяет сделать ряд заключений. Удельная поверхность и средний диаметр измельчаемого материала (рис. 13 и 14) принципиально не изменяются по времени в каждой секции вибромельницы, что говорит о хорошей сепарации продукта в обоих корпусах вибромельницы.

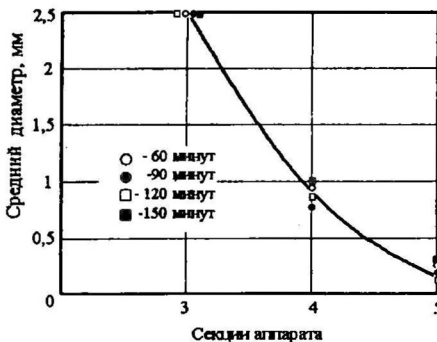


Рис. 13. Изменение эквивалентного диаметра частиц картофеля по длине аппарата непрерывного действия при рабочих параметрах аппарата $A = 1,07$ мм, $n = 2240$ об/мин.

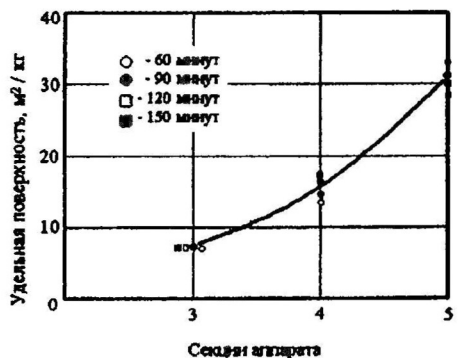


Рис. 14. Изменение удельной поверхности частиц картофеля по длине аппарата при рабочих параметрах аппарата $A = 1,07$ мм, $n = 2240$ об/мин.

Удельная поверхность с ростом параметров вибрации (рис.15 и 16) увеличивается по нелинейному закону и в определенный момент дальнейшее увеличение рабочих параметров не дает значительного роста. То же самое можно сказать и об изменении производительности.

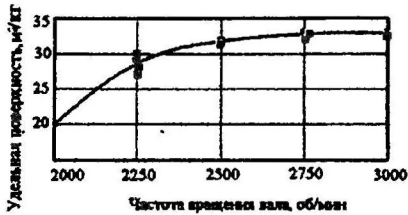


Рис. 15. Изменение удельной поверхности частиц порошка свеклы на выходе из установки в зависимости от частоты вращения вала вибратора при постоянной амплитуде колебаний, равной 1,1 мм.



Рис. 16. Изменение удельной поверхности частиц порошка черники на выходе из установки в зависимости от амплитуды колебаний при постоянной частоте вращения вала вибратора, равной 2500 об/мин.

Полученные кривые кинетики измельчения растительного сырья (рис.17) показывают, что процесс измельчения проходит более интенсивно при больших и малых значениях влажности (более 40% и менее 10%). Влияние жидкости на измельчение сказывается даже при незначительных ее добавках и резко возрастает при влажности больше 8%. При средних значениях влажности (~30÷40%) интенсивность измельчения снижается за счет слипания материала и образования конгломератов, а затем снова возрастает, достигая оптимума при влажности 50-80%.

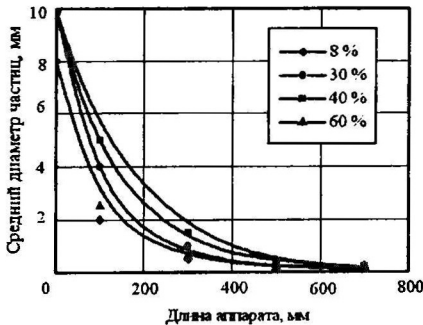


Рис. 17. Кинетические кривые измельчения картофеля различной влажности при рабочих параметрах аппарата $A = 1,1$ мм, $n = 2500$ об/мин.

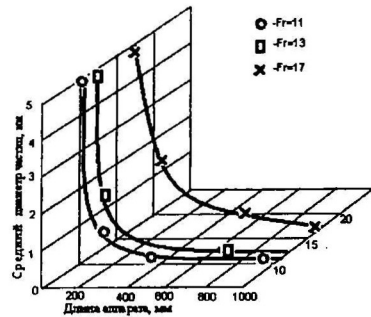


Рис. 18. Кинетические кривые измельчения черной смородины влажностью 8% при различных параметрах вибрации

Сравнивая кривые измельчения при различных значениях критерия Фруда (рис.18), можно сделать вывод, что интенсивность измельчения в пределах $Fr = 11-13$ меняется не-

значительно. Это подтверждает, что измельчение с сушкой можно проводить при оптимальных параметрах $Fr=8+11$, соответствующих максимальной скорости смешения.

В главе 4 представлены результаты экспериментальных исследований кинетики сушки растительного сырья при различных рабочих параметрах процесса на примере свеклы, лука, моркови, картофеля, черной смородины.

Для сравнительной оценки с результатами сушки в вибрационной сушилке-мельнице проводились экспериментальные исследования контактной сушки при атмосферном давлении и вакууме.

Зависимость скорости сушки при различных размерах частиц (рис.27, 28) показывает, что уменьшение размеров частиц менее чем $10\text{мм}\times 10\text{мм}\times 10\text{мм}$ увеличивает скорость сушки незначительно, либо уменьшает его. Такая закономерность сохраняется как при атмосферном давлении, так и при вакууме. Поэтому в технологическом процессе получения порошка для подготовки сырья можно использовать фазу подготовки корнеплодов для получения консервированного гарнира из свеклы или моркови с размером частиц $10\text{мм}\times 10\text{мм}\times 10\text{мм}$. Кроме того, начальный размер частиц высушиваемого материала позволяет выбрать оптимальные размеры и соотношения мельющих тел.

Зависимость скорости сушки мятых и цельных ягод черной смородины (рис. 26, 27) показывает, что увеличение количества свободной влаги и поверхности массообмена увеличивает скорость сушки и продолжительность первого периода постоянной скорости сушки.

Сравнение контактной сушки материалов в шкафах при атмосферном давлении и вакууме (рис.19-28) показывает, что снижение давления до 20 кПа увеличивает скорость сушки в 1,2 -1,5 раза.

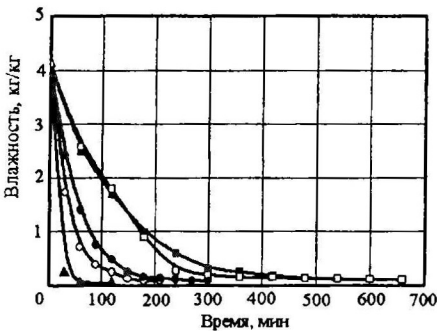


Рис.19. Кривые изменения влажности картофеля:

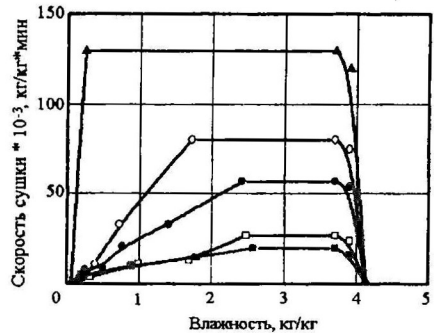


Рис.20. Кривые скорости сушки картофеля:

- - контактная сушка при атмосферном давлении;
- - контактная сушка при пониженном давлении;
- - сушка в ВСМ без вибрации при вакууме;
- - вибрационная сушка в ВСМ;
- ▲ - вибрационная сушка с измельчением в ВСМ

Вибрационное перемешивание в процессе сушки способствует интенсивному теплообмену между греющей поверхностью и загрузкой за счет перераспределения нагретых частиц в объеме загрузки, что выравнивает температуру и влажность в нем. Таким образом, в процессе вибрационной сушки (рис.19 - 24) скорость процесса возрастает в 3-3.5 раза по сравнению с контактной сушкой при атмосферном давлении.

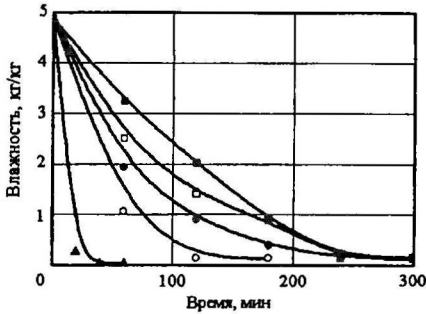


Рис.21. Кривые изменения влажности репчатого лука:

- - контактная сушка при атмосферном давлении;
- - контактная сушка при пониженном давлении;
- - сушка в ВСМ без вибрации при пониженном давлении;
- - вибрационная сушка в ВСМ;
- ▲ - вибрационная сушка с одновременным измельчением в ВСМ.

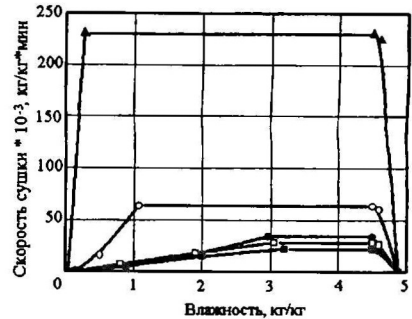


Рис.22. Кривые скорости сушки репчатого лука:

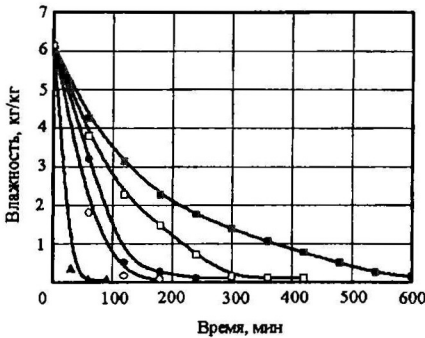


Рис.23. Кривые изменения влажности черной смородины:

- - контактная сушка при атмосферном давлении;
- - контактная сушка при пониженном давлении;
- - сушка в ВСМ без вибрации при пониженном давлении;
- - вибрационная сушка в ВСМ;
- ▲ - вибрационная сушка с одновременным измельчением в ВСМ.

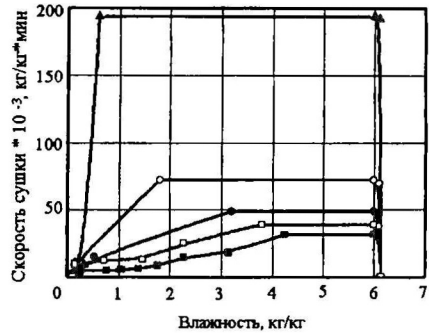


Рис.24. Кривые скорости сушки черной смородины:

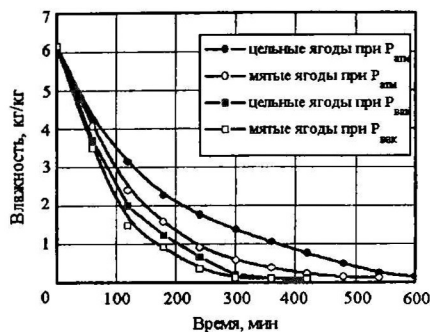


Рис.25. Кривые изменения влажности цельных и мятых ягод черной смородины при атмосферном и пониженном давлениях.

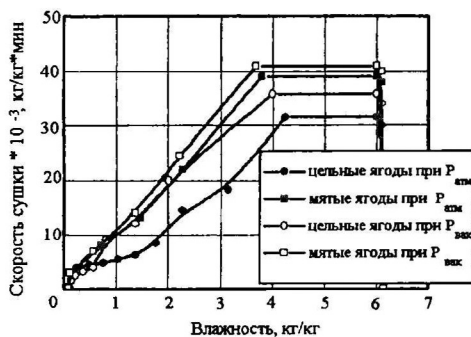


Рис.26. Кривые скорости контактной сушки цельных и мятых ягод черной смородины при атмосферном и пониженном давлениях.

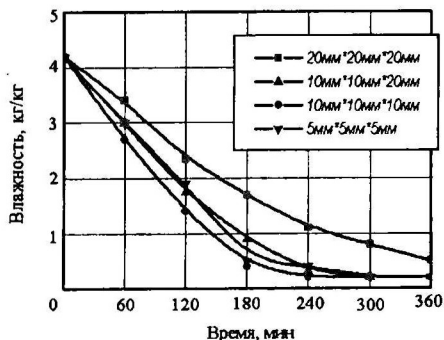


Рис.27. Кривые изменения влажности картофеля с различными начальными размерами частиц в течение контактной сушки при атмосферном давлении

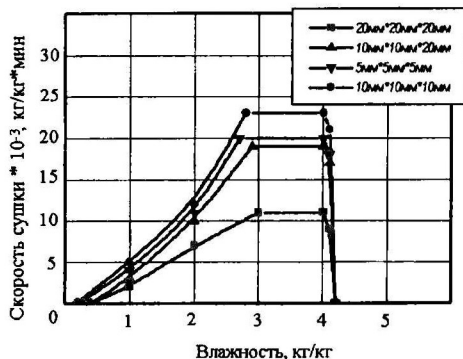


Рис.28. Кривые скорости сушки картофеля с различными начальными размерами частиц в течение контактной сушки при атмосферном давлении

Однако, основная интенсификация сушки растительного сырья происходит за счет применения одновременного вибрационного измельчения в процессе вакуумной сушки, что позволяет проводить процесс исключительно в первом периоде за счет постоянного увеличения поверхности удаления влаги, что увеличивает скорость процесса (рис.19-24) в 4-5 раз по сравнению с контактной сушкой при атмосферном давлении.

Вибрационная сушка при сопутствующем измельчении в аппарате непрерывного действия (рис. 19-24) позволяет вести процесс в первом периоде практически до полного высушивания частиц порошка.

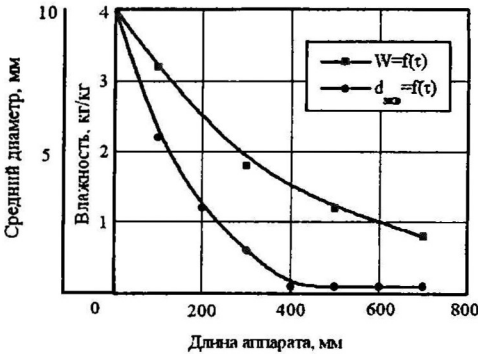


Рис.29. Кинетические кривые вибрационной сушки и измельчения картофеля при $Fr=11$.

тельного сырья заканчивается значительно быстрее его сушки. Таким образом, измельчение обеспечивает увеличение первого периода сушки, но не является лимитирующей стадией процесса получения порошков.

В главе 5 представлено математическое описание процесса получения порошков из

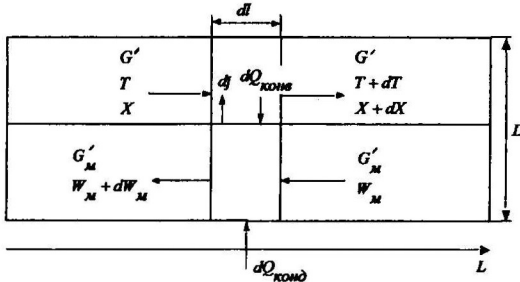


Рис. 30. Структура тепловых и материальных потоков для сушки с конвективно-кондуктивным подводом тепла.

сырья заканчивается значительно быстрее его сушки. Таким образом, измельчение обеспечивает увеличение первого периода сушки, но не является лимитирующей стадией процесса получения порошков.

$$G'X + dM = G'(X + dX) \quad (32)$$

Количество поступившей испаренной влаги:

$$dM = G'dX \quad (33)$$

$$dM = \beta dF(\bar{c}_n - \bar{c}) \quad (34)$$

Поверхность испарения влаги будет меняться по длине аппарата за счет постоянно-го измельчения перерабатываемого материала:

$$dF = dV \cdot S'_{y\partial} \cdot \kappa_{зан} = \frac{\pi D^2}{4} dl \cdot S'_{y\partial} \cdot \kappa_{зан} \quad (35)$$

С учетом влияния физико-механических и теплофизических особенностей растительного сырья полученные экспериментальные данные могут использоваться при создании научно обоснованной методики расчета процесса получения порошков в вибрационных аппаратах.

Для определения степени влияния измельчения на сушку произведена оценка интенсивности сушки и измельчения сравнением экспериментальной кривой вибрационной сушки без измельчения и кинетической кривой измельчения.

Анализируя кривые кинетики сушки и измельчения (рис.29), можно сделать вывод, что измельчение расти-

тельного сырья в вибрационной сушилке-мельнице, опирается на проведение сушки только в первом периоде с учетом кинетики измельчения и особенностей теплообмена виброкипящего слоя.

В вибрационной сушилке-мельнице высушиваемый материал движется противотоком по отношению к теплоносителю. Теплоноситель, проходя вдоль высушиваемого материала отдает тепло и насыщается парами испаренной влаги. В этом случае материальный баланс в парогазовой смеси по

влаге запишется в следующем виде:

Изменение диаметра частиц материала определяется из полученного обработкой экспериментальных данных критериального уравнения:

$$\frac{d}{d_n} = e^{-2,99 \cdot 10^{-9} \left(\frac{A}{D}\right)^{-4,21} \left(\frac{A \omega^2}{g}\right)^{1,53} \left(\frac{m_w}{\rho_n \cdot A^3}\right)^{1,47}} (\omega \tau) \quad (36)$$

Влагосодержание воздуха находится из выражения:

$$X = \frac{M_n}{M_g} \left(\frac{\bar{c}}{\rho_n - \bar{c}} \right) \quad (37)$$

Изменение влагосодержание воздуха по длине аппарата происходит за счет испарения влаги

$$\frac{dX}{dl} = \beta \frac{\pi D^2}{4G'} \cdot S'_{y\partial} \cdot \kappa_{зан} (\bar{c}_n - \bar{c}) \quad (38)$$

Выражая объемную концентрацию пара в паровоздушной смеси через влагосодержание получим:

$$\frac{dX}{dl} = \beta \frac{\pi D^2}{4G'} \cdot S'_{y\partial} \cdot \kappa_{зан} \left(\frac{X_n \rho_g \rho_n}{\rho_n + X_n \rho_g} - \frac{X \rho_g \rho_n}{\rho_n + X \rho_g} \right) \quad (39)$$

где темп изменения суммарной поверхности частиц:

$$A^* = \frac{\pi D^2}{4} \cdot S'_{y\partial} \cdot \kappa_{зан} \quad (40)$$

Тепловой баланс в паровоздушной смеси будет иметь следующий вид:

$$G' i_g'' + G' X i_n'' - dQ + dM i_{nM} = G' i_g' + G' (X + dX) i_n' \quad (41)$$

Количество тепла, подведенного к материалу конвективно можно найти:

$$dQ_{конв} = \alpha_{конв} dF (T - T_M) \quad (42)$$

Конечная температура воздуха:

$$T_k = T + dT \quad (43)$$

Начальная температура воздуха:

$$T_n = T \quad (44)$$

Преобразуя (41), подставив в него (42), (43), (44), сгруппировав члены и пренебрегая $dX dT$, ввиду малой величины, получим:

$$(G' c_g + G' X c_n) dT = -\alpha_{конв} dF (T - T_M) + G' dX c_n' (T - T_M) \quad (45)$$

Из данного выражения можно найти изменение температуры теплоносителя по длине аппарата:

$$\frac{dT}{dl} = -\frac{\alpha_{конв} \pi D^2 S'_{y\partial} k_{зан} (T - T_M)}{4G' (c_g + X c_n)} + \frac{dX}{dl} \frac{c_n' (T - T_M)}{c_g + X c_n} \quad (46)$$

Подставив в формулу (46) выражение (39), получим:

$$\frac{dT}{dl} = -\alpha_{конв} \frac{A^* (T - T_M)}{G' (c_g + X c_n)} + \beta \frac{A^*}{G'} \left(\frac{X_n \rho_g \rho_n}{\rho_n + X_n \rho_g} - \frac{X \rho_g \rho_n}{\rho_n + X \rho_g} \right) \frac{c_n' (T - T_M)}{c_g + X c_n} \quad (47)$$

Изменение влагосодержания материала происходит за счет испарения влаги, поэтому материальный баланс по высушиваемому материалу запишется в следующем виде:

$$G'_M W_c - dM = G'_M (W_c + dW_c) \quad (48)$$

Количество испаренной влаги:

$$dM = -G'_m dW_c \quad (49)$$

После некоторых преобразований изменение влажности материала запишем в виде:

$$\frac{dW_m}{dl} = \beta \frac{A^*}{G'_m} \left(\frac{X_n \rho_v \rho_n}{\rho_n + X_n \rho_v} - \frac{X \rho_v \rho_n}{\rho_n + X \rho_v} \right) \quad (50)$$

Однако для решения дифференциальных уравнений (39), (47), (50) необходимо добавить условие динамического равновесия на поверхности материала:

$$dQ_{\text{конв}} + dQ_{\text{конд}} = dM \cdot r \quad (51)$$

Или:

$$\alpha_{\text{конв}}(T - T_m) + \alpha_{\text{конд}} \xi (T_{\text{см}} - T_m) = \beta(\bar{c}_n - \bar{c}) \quad (52)$$

где $\xi = \frac{dF_m}{dF}$ - приведенный коэффициент

Принимая $T_{\text{см}} \approx T$, получим:

$$(\alpha_{\text{конв}} + \alpha_{\text{конд}} \xi)(T - T_m) = \beta(\bar{c}_n - \bar{c}) \quad (53)$$

Решается на каждом шаге методом последовательных приближений при следующих граничных условиях:

$$l = 0 : T = T_{\text{нач}}; \quad X = X_{\text{нач}}$$

$$l = L : W_m = W_{m, \text{нач}}$$

Ограничение:

$$W_m \geq W_I$$

Коэффициент теплообмена между греющей поверхностью и материалом находится:

$$\alpha_{\text{конд}} = \sqrt{\lambda_3 \rho_3 c_3} / \sqrt{\pi \tau_k} \quad (54)$$

где τ_k - периода контакта загрузки с греющей вибрирующей поверхностью.

С изменением влажности и дисперсного состава материала изменяются и теплофизические характеристики. Коэффициенты теплопроводности, теплоемкости и плотность загрузки находятся с учетом этих изменений и изменения соотношения «мелющие тела : материал» за счет уменьшения объема последнего в процессе сушки.

Доля периода контакта загрузки с греющей поверхностью τ_k находится с учетом взаимодействия загрузки с корпусом аппарата при изменении влажности и объема загрузки.

Коэффициенты теплоотдачи и массоотдачи при конвективном тепло и массообмене можно определить из уравнения Фресслинга.

Считаем, что весь процесс протекает исключительно в первом периоде сушки. Однако определить продолжительность первого и второго периода сушки можно по следующему алгоритму.

С началом работы аппарата продукт достаточно быстро измельчается и большая часть влаги находится не внутри частиц, а вне их. На рисунке 31 показано, что частицы твердой фазы соприкасаются друг с другом только через слой жидкой фазы, поскольку за счет постоянного измельчения, каждая твердая частица продукта покрыта слоем влаги. Считаем, что первый период постоянной скорости сушки длится до тех пор, пока твердые частицы соприкасаются друг с другом через поверхность жидкой фазы. Это свидетельствует о том, что испарение влаги идет со свободной поверхности. Когда частицы высушиваемого продукта будут соприкасаться друг с другом и между ними не будет прослойки

жидкости, можем считать, что в этот момент начинается второй период падающей скорости сушики. Однако, поскольку высушиваемый продукт имеет высокую дисперсность, можно предположить, что доля второго периода во всем процессе сушки будет существенно мала.

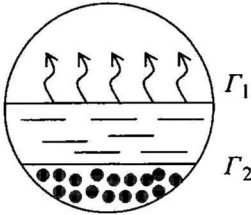


Рис. 31. Схема положения твердой и жидкой фазы в аппарате в начальный момент времени.

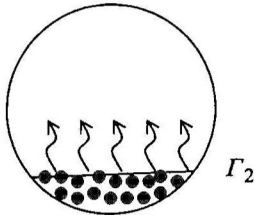


Рис. 32. Схема положения твердой и жидкой фазы в аппарате в момент времени, близкий началу второго периода.

Согласно предложенной схеме, критическое влагосодержание массы продукта, соответствующее началу второго периода сушки можно найти по формуле

$$W_I = \frac{M_{жс}}{M_{мс}} = \frac{\rho_{жс} V_{жс}}{\rho_{мс} V_{мс}} \quad (55)$$

Считаем, что второй период сушки начинается в тот момент, когда объем жидкой фазы становится меньше объема пор твердой фазы, то есть в системе недостаточно жидкости, чтобы покрыть поверхность всей твердой фазы.

Второй период сушки начинается, в момент времени, когда выполняется условие $V_{пор} > V_{вл}$.

Первое критическое влагосодержание можно определить:

$$W_I = \frac{\rho_{жс}}{\rho_{мс}} \cdot \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \quad (56)$$

Серия экспериментов, проведенная с различными продуктами, показали, что параметры, входящие в формулу (56) варьировались в диапазонах

$$1,3 < \frac{\rho_{мс}}{\rho_{жс}} < 1,6 \\ 0,3 < \varepsilon < 0,45$$

Подставляя полученные экспериментально значения

ε и $\frac{\rho_{мс}}{\rho_{жс}}$ в (56) и сравнивая полученные величины с вели-

чинами W_I экспериментальных кривых скорости сушки получили их хорошую сходимость, что доказывает верность предложенной схемы.

Безразмерная скорость сушки в первом периоде \bar{N} :

$$\bar{N} = \frac{1}{\omega} \frac{dW}{d\tau} = \frac{dW}{d\bar{\tau}} \quad (57)$$

Известно, что скорость первого периода, соответствующая испарению жидкости со свободной поверхности, зависит в основном от внешних факторов и не зависит от условий переноса влаги внутри материала.

В результате обработки экспериментальных данных получено уравнение:

$$\bar{N}_I = 2,35 \cdot 10^{-6} \cdot Fr^{2,14} \cdot Re^{0,215} \left(\frac{\rho_m W_n}{\rho_v} \right)^{2,378} \left(\frac{t_{ep}}{t_m} \right)^{1,03} \quad (58)$$

В случае, когда камера герметична и в ней поддерживается постоянное давление, а вакуум-насосом постоянно откачиваются пары испарившейся влаги, критерий Рейнольдса из уравнения исключается и тогда уравнение (58) будет иметь вид:

$$\bar{N}_I = 3,125 \cdot 10^{-5} \cdot Fr^{2,46} \cdot \left(\frac{\rho_m W_n}{\rho_s} \right)^{2,31} \left(\frac{t_{2p}}{t_m} \right)^{1,92} \quad (59)$$

Интегрируя (57) с учетом начального условия при $\tau = 0$ $W = W_n$ имеем

$$W = W_n - \bar{N}_I \bar{\tau} \quad (60)$$

Время окончания первого периода определяется из условия при $\bar{\tau} = \bar{\tau}_I$ $W = W_I$

$$\bar{\tau}_I = \frac{W_n - W_I}{\bar{N}_I} \quad (61)$$

Период падающей скорости сушки незначителен по сравнению с первым периодом сушки. Однако, рассчитать время второго периода сушки несложно, поскольку размеры материала незначительны и практически отсутствуют сопротивление материала диффузии влаги.

Экспериментальные кривые позволяют записать скорость сушки второго периода сушки в виде

$$\frac{dW}{d\bar{\tau}} = -kW \quad (62)$$

где k – коэффициент сушки, требующий определения.

Интегрируя (62) с учетом начального условия при $\bar{\tau} = \bar{\tau}_I$ $W = W_I$, получим

$$W = W_I e^{-k(\bar{\tau} - \bar{\tau}_I)} \quad (63)$$

Для того, чтобы определить неизвестный коэффициент модели k используем очевидные условия при $\bar{\tau} = \bar{\tau}_I$

$$\frac{dW}{d\bar{\tau}} = \bar{N}_I. \quad (64)$$

Это условие совместно с уравнением (63) позволяет определить коэффициент k и представить (64) в виде

$$W = W_I e^{-\bar{N}_I \frac{\bar{\tau} - \bar{\tau}_I}{W_I}} \quad (65)$$

или с учетом равенства (61) в виде

$$W = W_I e^{\left(-\frac{\bar{N}_I}{W} \bar{\tau} + \frac{W_0 - W_I}{W_I} \right)} \quad (66)$$

Формула (66) позволяет определить время окончания процесса сушки $\tau_{кон}$, если задать в ней конечное влагосодержание $W_{кон}$.

$$\tau_{кон} = \frac{1}{\bar{N}_I} \left[W_n - W_I \left(1 - \ln \frac{W_I}{W_k} \right) \right] \quad (67)$$

Таким образом, в первом периоде сушки текущая влажность материала рассчитывается по формуле

$$W = W_n - \bar{N}_I \bar{\tau} \quad (68)$$

Во втором периоде сушки текущая влажность рассчитывается по формуле

$$W = W_I e^{\left(-\frac{\bar{N}_I}{W_I} \bar{\tau} + \frac{W_n - W_I}{W_I} \right)} \quad (69)$$

В главе 6 представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований затрат мощности при переработке растительного сырья в вибрационных аппаратах. Просчитан полный баланс мощности для вибрационных машин. Расчет мощности на колебания корпуса с загрузкой удобно вести табличным способом, за счет изменения влажности. Экспериментально найдены значения коэффициентов трения пищевых порошков различной влажности о различные поверхности. Было экспериментально исследовано влияние всех факторов, входящих в систему уравнений и формул мощности.

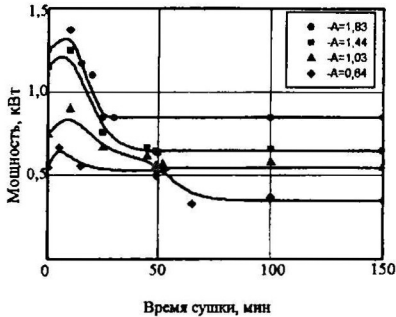


Рис. 31. Изменение мощности в процессе получения порошка картофеля при частоте $\nu = 50$ Гц и различных амплитудах колебаний.

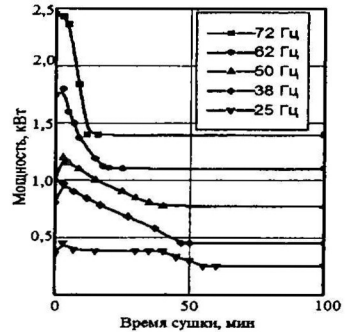


Рис. 32. Изменение затрат мощности в процессе получения порошка картофеля при $A = 1,44$ мм и при различных частотах 72, 62, 50, 38, 25 Гц

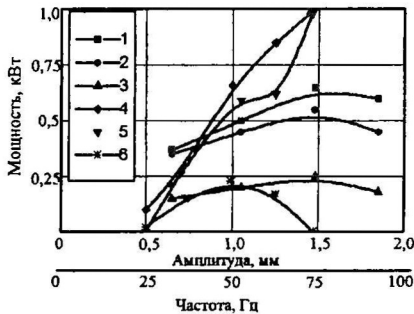


Рис. 33. Зависимость мощности, передаваемой нагрузке, от параметров вибрации корпуса для картофеля. 1, 2, 3 - N_{\max} , $N_{\text{нач}}$, $N_{\text{кон}}$ при различных амплитудах $\nu = 50$ Гц; 4, 5, 6 - N_{\max} , $N_{\text{нач}}$, $N_{\text{кон}}$ при различных частотах, $A = 1,44$ мм.



Рис. 34. Зависимость затрат мощности от остаточного давления при сушке картофеля. 1. $\nu = 50$ Гц, $A = 1,44$ мм; 2. $\nu = 62$ Гц, $A = 0,64$ мм

На рис. 31 и 32 приведены графики изменения мощности при различных амплитудах в ходе процесса получения порошка картофеля до установления конечной влажности ма-

териала 5-6%. Согласно этим графикам максимальная мощность передается загрузке при оптимальной амплитуде $A = 1,44$ мм, благодаря чему необходимая влажность состава достигается в наиболее короткий срок. Выявлено влияние параметров вибрации A и ω на затраты мощности: $N_{тр}$ - линейно зависит от A и в третьей степени от ω . Проверены оптимальные значения A и ω полученные по кинетике процесса, при которых $N_{кол} = \max$ и время перемешивания минимально. Влияние жесткости упругих опор в пределах $k = 4000-25000$ кг/м незначительно, не превышает ошибки опыта при работе в резонансном режиме. При выборе частоты собственных колебаний p_1^2 надо стремиться к низким значениям (2-3.5 Гц), чтобы быстро переходить в резонансный режим.

Соотношение веса загрузки и веса корпуса вибрационной машины определяется оптимальным коэффициентом заполнения объема и ее конструкции. Изменение массы загрузки в пределах оптимального значения влияет на мощность как простое изменение общей колеблющейся массы.

Влияние остаточного давления в камере аппарата на величину затрачиваемой мощности изучалось экспериментально при оптимальных значениях вибрации. Увеличение затрат мощности обратно пропорционально количеству воздуха. Воздух играет роль смазки между корпусом и составом, а также проявляет демпфирующие свойства, чем снижает давление при соударениях состава со стенкой. Это является причиной уменьшения сопротивления движению материала с увеличением количества воздуха.

В главе 7 представлены практические рекомендации по использованию вибрационных сушилок-мельниц для получения пищевых порошков из растительного сырья. Разработаны технологические схемы по производству пищевых порошков из растительного сырья, из отходов ликероводочного производства, а также по производству премиксов, используемых в животноводстве. Разработаны конструкции вибрационных сушилок-мельниц периодического и непрерывного действия, предназначенных для использования, как в пищевой промышленности, так и в смежных отраслях. Разработано и исследовано вспомогательное оборудование для разработанных технологических линий по производству пищевых порошков, в частности шнековые машины. В приложении к работе приведены результаты экспериментальных исследований, статистической обработки полученных данных, акты внедрений, подтверждающие практическое использование основных результатов работы предприятиями, результаты промышленных испытаний и паспорта созданных установок.

Условные обозначения: $П_1$ - параметрический критерий; A - амплитуда колебаний, м; D - внутренний диаметр корпуса смесителя, м; L - длина аппарата, м; l - длина, м; ω - угловая скорость вращения вала вибратора, 1/с; n - число оборотов вала вибратора, об/мин; ν - частота колебаний вала вибратора, Гц; f - коэффициент внешнего трения материала о поверхность корпуса; d - средний диаметр частиц, м; F - поверхность теплообмена, m^2 ; Fr - критерий Фруда; g - ускорение свободного падения, м/с²; m, M - масса, кг; τ - время, с; $\bar{\tau}$ - безразмерное время; G - вес, Н; G' - массовый расход, кг/с; \bar{N} - безразмерная скорость сушики; W - влажность материала, кг.вл/кг.сух; X - влагосодержание теплоносителя, кг.вл/кг.сух; r - удельная теплота парообразования, Дж/кг; $\kappa_{зан}$ - коэффициент заполнения аппарата; T - температура, °C; α - коэффициент теплоотдачи, Вт/м²К; β - коэффициент массоотдачи, м/с; V - объем, м³; $S_{уд}$ - удельная поверхность, м²/кг; $S'_{уд}$ - удельная поверхность, м²/м³; ε - порозность; ρ - плотность, кг/м³; μ - коэффициент динами-

ческой вязкости, $\frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}$; λ - коэффициент теплопроводности загрузки, Вт/м·К; c - удельная теплоемкость, Дж/кг·К; i - энтальпия, Дж/кг; Q - количество тепла, Дж; Re - критерий Рейнольдса; N - затраты мощности, кВт.

Индексы: н - начальное; к - конечное; в - воздух; п- пар; ш - шар; м - материал; с - сухой; ж - жидкий; тв - твердый; з - загрузка; конв - конвективный; конд - кондуктивный; max - максимальный; I - первый период сушки; II- второй период сушки.

Основные результаты и выводы по работе:

1. Разработаны способы получения порошков из растительного сырья совмещением процессов сушки и измельчения, удлиняющий период максимальной постоянной скорости сушки практически до полного высушивания материала (патент РФ № 2064477). Способ реализован в вибрационных сушилках-мельницах (патенты РФ № 2229340, 2413577, свидетельство на полезную модель № 14649).

2. Экспериментально получены интервалы оптимальных рабочих параметров в виде критериев: параметрического и Фруда, обеспечивающих максимальную интенсивность циркуляции загрузки при круговой траектории колебаний корпуса.

3. В результате экспериментальных исследований кинетики смешения в вибрационном аппарате получены расчетные зависимости времени пребывания перерабатываемого материала от режимных параметров. Разработан механизм послойного движения шаровой загрузки в вибрационном аппарате, позволяющий рационально проводить процесс измельчения растительного сырья, за счет выбора начального размера частиц в зависимости от амплитуды колебаний корпуса аппарата.

4. Получены расчетные зависимости определения условий циркуляции загрузки в вибрационном аппарате и времени контакта перерабатываемого материала с греющей поверхностью.

5. Экспериментальные исследования кинетики измельчения позволили установить:

- а) процесс измельчения не является лимитирующей стадией процесса получения порошков, а лишь обеспечивает первый период сушки до полного удаления влаги;
- б) влияние рабочих параметров на дисперсность готового порошка;
- в) кинетическую зависимость изменения среднего диаметра частиц по времени от различных параметров процесса.

6. Экспериментальные исследования кинетики сушки различного растительного сырья позволили установить кинетические закономерности процесса при атмосферном и пониженном давлении, при вибрационном воздействии и сопутствующем измельчении. Проведение сушки с одновременным измельчением растительного сырья позволило сократить время сушки в 8-10 раз по сравнению с конвективной сушкой при атмосферном давлении.

7. Экспериментально получены значения коэффициента внешнего трения для различного растительного сырья в зависимости от влажности образца, необходимые для расчета затрат мощности; математические зависимости затрат мощности на перемешивание загрузки в зависимости от режимных параметров процессов сушки и измельчения;

8. Разработано математическое описание процесса сушки растительного сырья при пониженном давлении с сопутствующим измельчением при кондуктивных и кондуктивно-конвективных способах подвода тепла, основанное на дифференциальных уравнениях балансов тепла и массы с учетом особенностей тепло и массообмена в вибрирующем слое. Проверена адекватность данного математического описания процесса получения порош-

ков экспериментальным данным. Получена удовлетворительная сходимость расчетных и экспериментальных исследований.

9. По результатам теоретических и экспериментальных исследований выявлены пути интенсификации процессов переработки растительного сырья: получены рациональные режимные параметры сушки, смешения и измельчения.

10. Разработаны новые конструкции сушильного оборудования, а также конструктивные рекомендации, направленные на ускорение процесса и улучшение качества высушиваемого материала, новизна конструкций подтверждена патентами; технологические схемы переработки растительного сырья в пищевые порошкообразные продукты; экспериментальные установки и методики исследований, позволяющие определить недостающие для моделирования характеристики.

Список опубликованных работ по теме диссертации:

Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК:

1. Галиакберов, З.К. Получение сухих порошков из растительного сырья / З.К. Галиакберов, Н.А. Николаев, Н.З. Галиакберова // Пищевая промышленность. - 1995. - №9. - С.32
2. Дубкова, Н.З. Исследование кинетики сушки при получении порошков из растительного сырья / Н.З. Дубкова, З.К. Галиакберов, Н.А. Николаев // Хранение и переработка сельскохозяйственного сырья. 2002.- №2. - С.23-24
3. Дубкова, Н.З. Кинетика вакуумной сушки при получении порошков из растительного сырья / Н.З. Дубкова, З.К. Галиакберов, Н.А. Николаев // Хранение и переработка сельскохозяйственного сырья. - 2002. - №10. - С.16-18.
4. Дубкова, Н.З. Кинетика измельчения в вибрационной сушилке-мельнице при производстве порошков из растительного сырья / Н.З. Дубкова, Г.И. Иванова, З.К. Галиакберов, Н.А. Николаев // Известия ВУЗов. Пищевая технология». - 2002. - №5-6. - С.270-271
5. Иванова, Г.И. Перемешивающая способность непрерывной вибрационной сушилки-мельницы / Г.И. Иванова, Н.З. Дубкова, Н.А. Ульянова, З.К. Галиакберов, Н.А. Николаев // Хранение и переработка сельскохозяйственного сырья. - 2003. - №10. - С.12-16.
6. Дубкова, Н.З. Исследование смесителей со шнеками, имеющими прямую обратную нарезку разного диаметра / Н.З. Дубкова, А.Н. Караваева, И.А. Дубков // Известия ВУЗов. Химия и химическая технология. - 2007. - Т.50. - №7. - С. 86-88
7. Дубкова, Н.З. Оценка эффективности и оптимизация обратных витков в шнековых смесителях / Н.З. Дубкова, З.К. Галиакберов, А.Н. Николаев // Химическая промышленность сегодня. - 2009. - № 12. - С. 35-41
8. Дубкова, Н.З. Способ снижения дефицита ионов йода в живом организме / Н.З. Дубкова, И.А. Дубков, З.К. Галиакберов, В.Ф. Шарафутдинов, А.Н. Николаев // Аграрная наука. - 2010. - №3. - С.21-22
9. Дубкова, Н.З. Технология получения порошка из ягод черники / Н.З. Дубкова, Э.Х. Тухбиева // Техника и технология пищевых производств. - 2010. - №2. - С.65-69
10. Тухбиева, Э.Х. Технология пищевых порошков из отходов ликеро-водочного производства / Э.Х. Тухбиева, Н.З. Дубкова, З.К. Галиакберов, В.Ф. Шарафутдинов, А.Н. Николаев // Известия ВУЗов. Пищевая технология. - 2010. - №2-3. - С.57-59
11. Дубкова, Н.З. Непрерывная технология производства пищевых порошков из растительного сырья / Н.З. Дубкова, Э.Х. Тухбиева // Известия ВУЗов. Пищевая технология. 2010. - № 4. - С.47-50

12. Дубкова, Н.З. Влияние формы и поверхности мелющих тел на кинетику сушки в технологии пищевых порошков / Н.З. Дубкова, В.Ф. Шарафутдинов, А.Н. Николаев // Хранение и переработка сельскохозяйственного сырья. 2010. - №7. - С.5-7

13. Дубкова, Н.З. Взаимодействие загрузки с корпусом вибрационного тепло- и массообменного аппарата / Н.З. Дубкова, З.К. Галиакберов, О.В. Козулина, А.Н. Николаев // Вестник Казанского технологического университета. - 2010. - №11. - С.100-108.

14. Дубкова Н.З. Исследование динамики мелющей загрузки в мельницах вибрационного типа / Н.З. Дубкова // Вестник Казанского технологического университета. - 2010. - №11. - С.436-442.

Статьи в других журналах и изданиях:

15. Дубкова, Н.З. Сушка пищевых продуктов в вибрационной вакуумной сушилке-мельнице / Н.З. Дубкова, З.К. Галиакберов, Н.А/ Николаев // Депонирована в ВИНТИ № 2167-В99 от 5.07.99 г. - 17 с.

16. Дубкова, Н.З. Исследования влияния различных факторов на процесс получения порошка из топинамбура / Н.З. Дубкова, Г.И. Иванова, З.К. Галиакберов, Н.А. Николаев, В.С. Минкин // Депонирована в ВИНТИ №1277-В2002 от 10.07.02. - 15 с.

17. Дубкова, Н.З. Интенсификация процессов в шнековых смесителях/ Н.З. Дубкова, Караваева А.Н, Дубков И.А. // Химическая промышленность.- 2006. - Т.83. - №8. - С. 370-374

18. Дубкова, Н.З. Производство пищевых порошков из растительного сырья / Н.З. Дубкова, З.К. Галиакберов, А.Н. Николаев // Интенсификация технологических процессов и оборудования пищевых производств: Межвузовский сборник научных трудов. Калининград. КГТУ. - 2009. - С. 13-22

19. Дубкова, Н.З. Непрерывный способ получения пищевых порошков / Н.З. Дубкова, З.К. Галиакберов, А.Н. Николаев // Интенсификация технологических процессов и оборудования пищевых производств: Межвузовский сборник научных трудов. Калининград. КГТУ. - 2009.- С. 23-32

20. Дубкова, Н.З. Влияние измельчения на процесс получения порошков из растительного сырья / Н.З. Дубкова, З.К. Галиакберов, А.Н. Николаев // Интенсификация технологических процессов и оборудования пищевых производств: Межвузовский сборник научных трудов. Калининград. КГТУ. - 2009.- С. 33-40

21. Дубкова, Н.З. Исследование непрерывного процесса получения пищевых порошков из растительного сырья / Н.З. Дубкова, Э.Х. Тухбиева // Депонирована в ВИНТИ № 266-В2010, от 11.05.2010. - 19с.

22. Дубкова, Н.З. Движение массива шаров в вибрационном аппарате с круговой траекторией колебаний корпуса / Н.З. Дубкова, Э.Х. Тухбиева // Депонирована в ВИНТИ № 267-В2010, от 11.05.2010. - 19 с.

Патенты:

23. Пат. 2064477 Российская Федерация, С09В61/00. Способ получения порошков из растительного сырья / З.К. Галиакберов, Н.А. Николаев, Н.З. Галиакберова, 93043938/13, заявл. 07.09.1993, опубл. 27.07.1996. БИ № 21.

24. Пат. 2229340 Российская Федерация, В02С17/14. Вибрационная шаровая мельница / Н.З. Дубкова и др, 2002117225/03, заявл. 27.06.2002, опубл. 27.05.2004. БИ № 15.

25. Пат. 2413577 Российская Федерация, В02С19/16 (2006.01), В02С17/14 (2006.01). Вибрационная шаровая мельница / Н.З. Дубкова и др, 2009140558/21, заявл. 02.11.2009, опубл. 10.03.2011. БИ №7.

26. Пат. 2229244 Российская Федерация, А23К1/16, А23К1/175. Способ приготовления премиксов / Дубкова Н.З., Габитов М.Р., Галиакберов З.К. и др, 2002118887/13, заявл. 15.07.2002, опубл. 27.05.2004. БИ № 15.

27. Вибрационная сушилка-мельница / Н.З. Дубкова, Г.И. Иванова, З.К. Галиакберов, Н.А. Николаев // Свидетельство на полезную модель № 14649 от 10.08.2000г.

Материалы научных конференций и другие работы:

28. Дубкова, Н.З. Производство пищевых порошков из растительного сырья / Н.З. Дубкова, З.К. Галиакберов, Н.А. Николаев // Холод и пищевые производства. С.Петербург. 1996. - С.12

29. Дубкова, Н.З. Сухие напитки с мякотью / Н.З. Дубкова, З.К. Галиакберов, Н.А. Николаев // Пищевая промышленность-2000. Казань. - 1996. - С.48.

30. Дубкова, Н.З. Сухие порошки из растительного сырья / Н.З. Дубкова, З.К. Галиакберов, Н.А. Николаев // Пищевая промышленность-2000. Казань. - 1996. - С.49.

31. Дубкова, Н.З. Производство сухих порошков из растительного сырья / Н.З. Дубкова, З.К. Галиакберов, Н.А. Николаев // Материалы совместного заседания президиума АН РТ и коллегии Министерства сельского хозяйства и продовольствия РТ. Казань. - 1996. - С.36.

32. Дубкова, Н.З. Производство лечебно - профилактических порошков из растительного сырья / Н.З. Дубкова, З.К. Галиакберов, Н.А. Николаев // Экологическая защита городов: материалы научно-технической конференции. - Москва, ВИМИ. 1996. - С.112

33. Коновалов, А.Ю. Теплообмен в вибрационной сушилке-мельнице / А.Ю. Коновалов, Н.З. Дубкова // Пищевые технологии: материалы конференции молодых ученых. Казань. 1998. - С.96.

34. Иванова, Г.И. Топинамбур - энергетический и фармацевтический потенциал республики Татарстан / Г.И. Иванова, Н.З. Дубкова // Пищевые технологии: материалы конференции молодых ученых. Казань. 1998. - С.97.

35. Карелина, Т.В. Вибрационная технология получения порошка из растительного сырья / Т.В. Карелина, Н.З. Дубкова // Пищевые технологии: материалы конференции молодых ученых. Казань. 1998. - С.99.

36. Дубкова, Н.З. Высокоэффективный процесс сушки корнеплодов / Н.З. Дубкова, З.К. Галиакберов, Н.А. Николаев // Пищевая промышленность-2000. Казань.- 1998. -С.55.

37. Дубкова, Н.З. Энергосберегающая технология пищевых порошков / Н.З. Дубкова, З.К. Галиакберов, Н.А. Николаев // Ресурсосберегающие технологии пищевых производств. С.Петербург, 1998. - С.115

38. Дубкова, Н.З. Математическое моделирование процесса перемешивания в вибрационной сушилке -мельнице / Н.З. Дубкова, Г.И. Иванова, З.К. Галиакберов, Н.А. Николаев // Методы кибернетики химико-технологических процессов: материалы международной конференции. Казань, 1999. - С. 85.

39. Левагина, Е.А. Сравнительная оценка кинетики сушки различного растительного сырья / Е.А. Левагина, Л.Я. Миндубаева, Н.З. Дубкова // Пищевые технологии: материалы конференции молодых ученых. Казань. 1999. - С.73.

40. Иванова, Г.И. Кинетика сушки топинамбура / Г.И. Иванова, Н.З. Дубкова // Пищевые технологии: материалы конференции молодых ученых. Казань. 1999. - С.74.

41. Зайнуллин, А.Ф. Кинетика измельчения сухого растительного сырья / А.Ф. Зайнуллин, Н.З. Дубкова // Пищевые технологии: материалы конференции молодых ученых. Казань. 1999. - С.75.

42. Иванова, Г.И. Продукты из топинамбура – питание XXI века / Г.И. Иванова, Н.З. Дубкова, З.К. Галиакберов, Н.А. Николаев // Пищевая промышленность XXI век: материалы Всероссийской научно-технической конференции. Тольятти. 2001.- С. 111.
43. Габитов, М.Р. Получение высококачественных продуктов животноводства / М.Р. Габитов, Н.З. Дубкова, И.А. Дубков, З.К. Галиакберов // Пищевые технологии: материалы межрегиональной конференции молодых ученых. Казань. 2001. – С.45.
44. Дубкова, Н.З. Непрерывный вибрационный смеситель / Н.З. Дубкова, Г.И. Иванова, З.К. Галиакберов, Н.А. Николаев // Пищевые технологии: материалы межрегиональной конференции молодых ученых. Казань. 2003. – С.66.
45. Дубкова, Н.З. Интенсификация процесса сушки продуктов сельскохозяйственного производства в аппарате с интенсивным аэродинамическим режимом / Н.З. Дубкова, Г.И. Иванова, З.К. Галиакберов, Н.А. Николаев // Оптимизация сложных биотехнологических систем: материалы всероссийской научно-практической конференции. Оренбург. 2003. – С. 41.
46. Валетова, И.Г. Измельчение в технологии пищевых порошков / И.Г. Валетова, Н.З. Дубкова, З.К. Галиакберов, Н.А. Николаев // Пищевые технологии: материалы общероссийской конференции молодых ученых. Казань. 2005. – С.72.
47. Дубкова, Н.З. Оценка состава порошка и сырья при вибровacuумной обработке / Н.З. Дубкова, З.К. Галиакберов, Н.А. Николаев // Пищевые технологии: материалы общероссийской конференции молодых ученых. Казань. 2005. – С.73.
48. Бердникова, С.В. Вариант утилизации отходов ликероводочного производства / С.В. Бердникова, Н.З. Дубкова, И.Б. Ефремов, З.К. Галиакберов, Н.А. Николаев // Пищевые технологии: материалы общероссийской конференции молодых ученых. Казань. 2005. – С.75.
49. Дубкова, Н.З. Новый способ профилактики йодной недостаточности / Н.З. Дубкова, И.А. Дубков, З.К. Галиакберов, Н.А. Николаев // Пищевая промышленность: интеграция науки, образования и производства: материалы всероссийской научно-практической конференции. Краснодар. 2005. С.390
50. Дубкова, Н.З. Вибровacuумный способ получения порошков из растительного сырья / Н.З. Дубкова, З.К. Галиакберов, Н.А. Николаев // Пищевая промышленность: интеграция науки, образования и производства: материалы всероссийской научно-практической конференции. Краснодар. 2005.- С.391
51. Закирова, А.Р. Влияние формы и размеров мелющих тел на кинетику сушки в производстве пищевых порошков / А.Р. Закирова, Н.З. Дубкова, З.К. Галиакберов // Пищевые технологии: материалы общероссийской конференции молодых ученых. Казань. 2006. – С.101.
52. Гаврилова, Е.А. Утилизация остатков ликероводочного производства / Е.А. Гаврилова, Н.З. Дубкова, З.К. Галиакберов // Пищевые технологии: материалы общероссийской конференции молодых ученых. Казань. 2006. – С.102.
53. Гимадиева, А.И. Оценка перемешивающей способности шнеков с прямой и обратной нарезками / А.И. Гимадиева, Н.З. Дубкова, З.К. Галиакберов, А.Н. Николаев // Пищевые технологии и биотехнологии: материалы IX Международной конференции молодых ученых. Казань. 2008. – С.155.
54. Ячменев, В.И. Оптимизация рабочих параметров вибрационного смесителя непрерывного действия / В.И. Ячменев, Н.З. Дубкова, З.К. Галиакберов, А.Н. Николаев // Пищевые технологии и биотехнологии: материалы IX Международной конференции молодых ученых. Казань. 2008. – С.156.

55. Дубкова, Н.З. Производство пищевых порошков в аппаратах с совмещением технологических стадий действия / Н.З. Дубкова, З.К. Галиакберов, А.Н. Николаев // Инновационные технологии переработки сельскохозяйственного сырья в обеспечении качества жизни: наука, образование и производство: материалы международной научно-технической конференции. Воронеж. 2008. – С.91

56. Дубкова, Н.З. Способ снижения дефицита йода в организме человека / Н.З. Дубкова, З.К. Галиакберов, А.Н. Николаев // Инновационные технологии переработки сельскохозяйственного сырья в обеспечении качества жизни: наука, образование и производство: материалы международной научно-технической конференции. Воронеж. 2008. – С.190

57. Дубкова, Н.З. Решение проблемы дефицита ионов йода / Н.З. Дубкова, И.А. Дубков, З.К. Галиакберов, А.Н. Николаев // Пищевые технологии и биотехнологии: материалы X Международной конференции молодых ученых. Казань. 2009. – С.198.

58. Дубкова, Н.З. Технология производства пищевых порошков из растительного сырья / Н.З. Дубкова, З.К. Галиакберов, А.Н. Николаев // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: Материалы 2-й Всерос. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Бийск. 14-15 мая 2009. – С. 218-220

59. Дубкова, Н.З. Технология переработки соломы в качественный корм для животных / Н.З. Дубкова, З.К. Галиакберов, А.Н. Николаев // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: Материалы 2-й Всерос. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Бийск. 14-15 мая 2009. – С. 230-232.

60. Дубкова, Н.З. Способ профилактики недостатка йода / Н.З. Дубкова, З.К. Галиакберов, А.Н. Николаев // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: Материалы 2-й Всерос. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Бийск. 14-15 мая 2009. – С. 220-222.

61. Тухбиева, Э.Х. Исследование перемешивающей способности непрерывной вибрационной сушилки-мельницы / Э.Х. Тухбиева, Н.З. Дубкова, З.К. Галиакберов, А.Н. Николаев // Современное состояние и перспективы развития пищевой промышленности и общественного питания: Материалы III научно-практ. конф. с межд. Участием. Челябинск. 2009. – С.243.

62. Тухбиева, Э.Х. Непрерывная вибрационная сушилка-мельница для производства пищевых порошков / Э.Х. Тухбиева, Н.З. Дубкова, З.К. Галиакберов, А.Н. Николаев // Современное состояние и перспективы развития пищевой промышленности и общественного питания: Материалы III научно-практ. конф. с межд. Участием. Челябинск. 2009. – С.240

63. Тухбиева, Э.Х. Интенсификация процесса получения сухих порошков из растительного сырья / Э.Х. Тухбиева, Н.З. Дубкова, И.А. Дубков, З.К. Галиакберов, А.Н. Николаев // Пищевые технологии и биотехнологии: материалы XI Международной конференции молодых ученых. Казань. 2010. – С.156.

64. Тухбиева, Э.Х. Вибрационная сушилка-мельница / Э.Х. Тухбиева, Н.З. Дубкова, И.А. Дубков, З.К. Галиакберов, А.Н. Николаев // Пищевые технологии и биотехнологии: материалы XI Международной конференции молодых ученых. Казань. 2010. – С.157.

65. Тухбиева, Э.Х. Движение загрузки в вибрационной мельнице / Э.Х. Тухбиева, Н.З. Дубкова, И.А. Дубков, З.К. Галиакберов, А.Н. Николаев // Пищевые технологии и биотехнологии: материалы XI Международной конференции молодых ученых. Казань. 2010. – С.160.

66. Тухбиева, Э.Х. Механизм отрыва мелющих тел от вибрирующего корпуса / Э.Х. Тухбиева, Н.З. Дубкова, И.А. Дубков, З.К. Галиакберов, А.Н. Николаев // Пищевые технологии и биотехнологии: материалы XI Международной конференции молодых ученых. Казань. 2010. – С.161.

67. Тухбиева, Э.Х. Непрерывная вибрационная сушилка-мельница / Н.З. Дубкова, Э.Х. Тухбиева // Научный потенциал студенчества в XXI веке: материалы IV Международной научной конференции студентов, аспирантов, молодых ученых. Ставрополь. 2010. - С. 505-508.

68. Дубкова, Н.З. Производство пищевых порошков из растительного сырья / Н.З. Дубкова, Э.Х. Тухбиева, А.Н. Николаев // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов: материалы межд. научно-технического семинара. Воронеж. 2010. - С. 194-198.

69. Дубкова, Н.З. Методика технологического расчета вибрационной вакуумной сушилки-мельницы для получения порошка из растительного сырья / Н.З. Дубкова, З.К. Галиакберов, Н.А. Николаев // Методическое пособие КГТУ, Казань, 2001. - 12с.

70. Дубкова, Н.З. Движение массива шариков в вибрационном аппарате с круговой траекторией колебания корпуса / Н.З. Дубкова, Э.Х. Тухбиева, З.К. Галиакберов, А.Н. Николаев // Математические методы в технике и технологиях: материалы XXIII международной научной конференции. Саратов. 2010. т. 3. - С. 108-111.

71. Дубкова, Н.З. Условие отрыва слоя жидкости от вибрирующей поверхности / Н.З. Дубкова, Э.Х. Тухбиева, З.К. Галиакберов, А.Н. Николаев // Математические методы в технике и технологиях: материалы XXIII международной научной конференции. Саратов. 2010. т. 3. - С. 164-165.

72. Тухбиева, Э.Х. Непрерывная технология производства пищевых порошков из растительного сырья / Э.Х. Тухбиева, Н.З. Дубкова, З.К. Галиакберов, А.Н. Николаев // II международная научно-техническая конференция: «Новое в технике и технологии пищевых производств», Воронеж, 2010. - С.418-419.

73. Тухбиева, Э.Х. Получение пищевого порошка из свежемороженой черники в вибро-вакуумной сушилке мельницы / Э.Х. Тухбиева, Н.З. Дубкова, З.К. Галиакберов, А.Н. Николаев // II международная научно-техническая конференция: «Новое в технике и технологии пищевых производств», Воронеж, 2010. - С.420.

74. Тухбиева, Э.Х. Кинетика измельчения в вибрационной сушилке-мельнице при производстве порошков из растительного сырья / Э.Х. Тухбиева, Н.З. Дубкова, З.К. Галиакберов, А.Н. Николаев // 3-я Всероссийская научно-практическая конференция: «Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности», Бийск, 2010. - С.361-363.

75. Тухбиева, Э.Х. Технология пищевых порошков из отходов ликеро-водочного производства / Э.Х. Тухбиева, Н.З. Дубкова, З.К. Галиакберов, А.Н. Николаев // 3-я Всероссийская научно-практическая конференция: «Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности», Бийск, 2010. - С.323-325.

76. Тухбиева, Э.Х. Непрерывная технология производства пищевых порошков из растительного сырья / Э.Х. Тухбиева, Н.З. Дубкова, З.К. Галиакберов, А.Н. Николаев // V научно-практическая конференция молодых ученых. Магнитогорск, 2010. - С.209-211.

Соискатель



Н.З. Дубкова

Заказ № 286

Тираж 120 экз.

Офсетная лаборатория Казанского национального исследовательского
технологического университета 420015, Казань, К.Маркса, 68

